

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

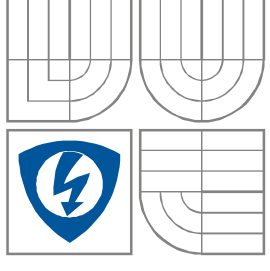
DOPPLEROVSKÝ RADAR PRO MĚŘENÍ RYCHLOSTI VOZIDEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADOMÍR KULIG

BRNO 2008

	VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
	FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DOPPLEROVSKÝ RADAR PRO MĚŘENÍ RYCHLOSTI VOZIDEL

TRAFFIC DOPPLER RADAR

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Radomír Kulig
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Jiří Šebesta, PhD.
SUPERVISOR

BRNO, 2008

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Radomír Kulig
Bytem: Horní Bludovice 393, Horní Bludovice, 739 37
Narozen/a (datum a místo): 4. srpna 1984 ve Frýdku-Místku

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací
technika
(dále jen „nabyvatel“)

Článek 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☒ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Dopplerovský radar pro měření rychlosti vozidel

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30. května 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Dopplerovský radar pro měření rychlosti vozidel jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. května 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Šebestovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 30. května 2008

.....
podpis autora

Abstrakt

Tato práce se zabývá měřením rychlosti objektů pomocí dopplerovského radaru, komunikujícího s okolím prostřednictvím rozhraní RS232. Práce obsahuje kompletní řešení tohoto dopplerovského radaru a to jak z pohledu schémat zapojení jednotlivých dílčích obvodů tak i programu pro řídící mikroprocesor. Na konci práce jsou pak shrnuta měření rychlosti prostřednictvím tohoto radaru.

Abstract

This work deals with problematics of speed measurement of an object with a Doppler radar. This radar communicates with other environment through RS232 interface. The complete solution of this Doppler radar is provided in the thesis. There are electrical schemes of all parts and program to control microcontroller in this work. Speed measurements for the radar are summarized in the end of the work.

Obsah

ÚVOD	5
1. ROZDĚLENÍ DETEKTORŮ DOPRAVNÍCH RADARŮ	6
1.1 MIKROVLNNÉ DETEKTORY	6
1.1.1 Dopplerův radar	6
1.1.2 Radar s frekvenčně modulovanými spojitými vlnami FMCW	6
1.1.3 Vlastnosti mikrovlnných radarů	6
1.2 INFRAČERVENÉ DETEKTORY	6
1.2.1 Aktivní	7
1.2.2 Pasivní	7
1.3 ULTRAZVUKOVÉ DETEKTORY	7
1.4 KOMBINOVANÉ DETEKTORY	8
2. PRINCIP AKTIVNÍHO RADIOLOKÁTORU	9
2.1 DOPPLERŮV PRINCIP	9
2.2 MIKROVLNNÉ RADAROVÉ SENZORY PRO DETEKCI A URČENÍ VELIKOSTI POHYBU POMOCÍ DOPPLEROVA JEVU	9
2.3 RADIOLOKAČNÍ ROVNICE	9
2.4 MAXIMÁLNÍ DOSAH RADIOLOKÁTORU	11
2.5 URČENÍ RYCHLOSTI OBJEKTU ZE ZÁZNĚJOVÉHO SIGNÁLU	11
3. ROZBOR JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ RADARU	12
3.1 VYSOKOFREKVENČNÍ MODUL	12
3.2 VÝPOČETNÍ MODUL	12
3.3 ZOBRAZOVACÍ MODUL	13
4. VLASTNÍ NÁVRH VÝPOČETNÍ ČÁSTI DOPPLEROVSKÉHO RADARU	14
4.1 BLOK AD PŘEVODU	14
4.1.1 Kritéria výběru AD převodníku	15
4.1.2 Vlastnosti vybraného AD převodníku	15
4.1.3 Volba zapojení bloku AD převodníku	17
4.1.4 Propojení bloku AD převodníku s blokem mikroprocesoru	18
4.2 BLOK ROZHRAŇÍ	20
4.2.1 Sériové rozhraní RS232 – základní informace	20
4.2.2 Výběr a vlastnosti obvodu pro realizaci rozhraní RS232	20
4.2.3 Zapojení obvodu MAX3232	21
4.2.4 Propojení bloku rozhraní s blokem mikroprocesoru	22
4.3 BLOK MIKROPROCESORU	23
4.3.1 Kritéria výběru obvodu mikroprocesoru	23
4.3.2 Vlastnosti vybraného mikroprocesoru	24
4.3.3 Volba zapojení bloku mikroprocesoru s obvodem ATmega2560	26
5. NÁVRH DALŠÍCH ČÁSTÍ SYSTÉMU RADARU	29
5.1 NÁVRH OBVODŮ STABILIZACE NAPĚTÍ	29
5.2 NÁVRH OBVODŮ ÚPRAVY VSTUPNÍHO SIGNÁLU	31
5.2.1 Mikrovlnný pohybový senzor	31
5.2.2 Návrh obvodu pro filtraci záznějového signálu	32
5.2.3 Návrh obvodu pro samočinné řízení zesílení vstupního signálu	35
6. REALIZACE SYSTÉMU	40
7. POPIS PROGRAMU MIKROPROCESORU ATMEGA2560	42
7.1 TEORETICKÝ POPIS PROGRAMU	42
7.2 APLIKACE BODŮ UVEDENÝCH V ODDÍLU 7.1 NA DANOU SITUACI	44
7.3 ROZBOR JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ REÁLNÉHO FUNKČNÍHO PROGRAMU MIKROKONTROLÉRU	45
7.3.1 Programové ovládání AD převodníku	45
7.3.2 Programové ovládání sériové linky	47
7.3.3 Programové řešení výpočtu rychlosti z naměřených vzorků	49
7.3.4 Funkce MAIN programu	50

7.3.5 Časové relace programu a paměťové nároky.....	52
8. OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI NAVRŽENÉHO MODULU MĚŘENÍM.....	53
8.1 OVĚŘOVÁNÍ FUNKČNOSTI MODULU V LABORATORNÍCH PODMÍNKÁCH.....	53
8.1.1 Závislost vypočtené rychlosti na kmitočtu simulovaného záznamového signálu.....	53
8.1.2 Závislost vypočtené rychlosti na amplitudě simulovaného záznamového signálu.....	56
8.1.3 Závislost vypočtené rychlosti na tvaru průběhu záznamového signálu a jeho kmitočtu.....	58
8.1.4 Měření odběru modulu.....	61
8.2 OVĚŘOVÁNÍ FUNKČNOSTI MODULU V REÁLNÝCH PODMÍNKÁCH.....	61
9. ZÁVĚR.....	62
LITERATURA.....	63
PŘÍLOHA 1 – SCHÉMA ZAPOJENÍ JEDNOTLIVÝCH BLOKŮ VÝPOČETNÍHO MODULU. 64	64
A) SCHÉMA ZAPOJENÍ BLOKU AD PŘEVODU.....	64
C) SCHÉMA ZAPOJENÍ BLOKU ROZHŘANÍ.....	66
PŘÍLOHA 2 – VÝROBNÍ PODKLADY PRO DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ JEDNOTLIVÝCH BLOKŮ SYSTÉMU.....	67
A) VÝROBNÍ PODKLADY PRO DESKU PLOŠNÝCH SPOJŮ BLOKU AD PŘEVODU.....	67
B) VÝROBNÍ PODKLADY PRO DESKU PLOŠNÝCH SPOJŮ BLOKU MIKROPROCESORU.....	69
C) VÝROBNÍ PODKLADY PRO DESKU PLOŠNÝCH SPOJŮ BLOKU ROZHŘANÍ.....	72
PŘÍLOHA 3 – POPIS SYSTÉMOVÉ SBĚRNICE A PROPOJENÍ DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ JEDNOTLIVÝCH BLOKŮ ZAŘÍZENÍ.....	74
PŘÍLOHA 4 – SCHÉMA ZAPOJENÍ JEDNOTLIVÝCH BLOKŮ MODULU VSTUPNÍ ÚPRAVY SIGNÁLU VČETNĚ KUSOVNÍKU.....	79
SCHÉMA ZAPOJENÍ MODULU VSTUPNÍ ÚPRAVY SIGNÁLU.....	79
KUSOVNÍK MODULU VSTUPNÍ ÚPRAVY SIGNÁLU.....	80
PŘÍLOHA 4 - SIMULACE PROGRAMOVÉHO VYBAVENÍ MIKROKONTROLÉRU V PROSTŘEDÍ MATLAB.....	81
PŘÍLOHA 5 – FOTOGRAFIE.....	83

Seznam obrázků

OBRÁZEK 4.1 – PROPOJENÍ VÝPOČETNÍHO MODULU S OKOLNÍMI MODULY	14
OBRÁZEK 4.2 – PROPOJENÍ DÍLČÍCH BLOKŮ VÝPOČETNÍHO MODULU	14
OBRÁZEK 4.3 – SCHÉMA AD7492 VČETNĚ ROZLOŽENÍ LINEK	16
OBRÁZEK 4.4 – KOMUNIKACE S AD PŘEVODNÍKEM AD7492, PŘEVZATO Z [8]	17
OBRÁZEK 4.5 – NASTAVENÍ SIGNÁLŮ CS', RD' A PS/FS'	18
OBRÁZEK 4.6 - ROZLOŽENÍ LINEK NA 9TI PINOVÉM KONEKTORU CANNON.....	20
OBRÁZEK 4.7 – PROPOJENÍ LINEK NULOVÉHO MODEMU	21
OBRÁZEK 4.8 – SCHÉMA MAX3232 VČETNĚ ROZLOŽENÍ LINEK	21
OBRÁZEK 4.9 – ZAPOJENÍ OBVODU MAX3232 MEZI MIKROPROCESOR A KONEKTORY	22
OBRÁZEK 4.10 - KATALOGOVÉ ZAPOJENÍ OBVODU MAX3232.....	22
OBRÁZEK 4.11 - SCHÉMA ATMEGA2560 VČETNĚ ROZLOŽENÍ LINEK, PŘEVZATO Z [6]	25
OBRÁZEK 4.12 – SCHÉMA ZAPOJENÍ OBVODU NASTAVENÍ REFERENCE TL431	27
OBRÁZEK 4.13 – SCHÉMA ZAPOJENÍ OBVODU PRO GENEROVÁNÍ RESET' SIGNÁLU TL7705	27
OBRÁZEK 4.14 – POHLED SHORA NA ZAPOJENÍ KONEKTORU ISP	28
OBRÁZEK 5.1 – SCHÉMA ZAPOJENÍ LM7805	29
OBRÁZEK 5.2 – SCHÉMA ZAPOJENÍ MC34063	29
OBRÁZEK 5.3 – SCHÉMA ZAPOJENÍ MĚNIČE MC34063 S DOPLNĚNÍM PARAMETRŮ SOUČÁSTEK	31
OBRÁZEK 5.4 – BLOKOVÉ SCHÉMA OBVODŮ ÚPRAVY VSTUPNÍHO SIGNÁLU	32
OBRÁZEK 5.5 – SCHÉMA ZAPOJENÍ DOLNÍ PROPUSTI TŘETÍHO ŘÁDU	32
OBRÁZEK 5.6 - SCHÉMA ZAPOJENÍ HORNÍ PROPUSTI TŘETÍHO ŘÁDU	33
OBRÁZEK 5.7 - PROPOJENÍ DOLNÍ A HORNÍ PROPUSTI S UVEDENÍM KONKRÉTNÍCH HODNOT PASIVNÍCH SOUČÁSTEK	35
OBRÁZEK 5.8 – BLOKOVÉ SCHÉMA OBVODU AUTOMATICKÉHO ŘÍZENÍ ZESÍLENÍ.....	35
OBRÁZEK 5.9 – POUŽITÉ ZAPOJENÍ ŘÍZENÉHO ZESILOVAČE AD603	36
OBRÁZEK 5.10 – USMĚRŇOVAČ S OPERAČNÍM ZESILOVAČEM AD8137.....	37
OBRÁZEK 5.11 – INTEGRÁTOR S OPERAČNÍM ZESILOVAČEM TL072	38
OBRÁZEK 5.12 – VÝSTUPNÍ ODDĚLOVAČ S OPERAČNÍM ZESILOVAČEM TL072	38
OBRÁZEK 5.13 – KOMPLETNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ ZESILOVACÍCH OBVODŮ	39
OBRÁZEK 6.1 – ROZVRŽENÍ KONEKTORŮ SYSTÉMOVÉ SBĚRNICE PŘI POHLEDU HRORA NA DPS	40
OBRÁZEK 6.2 – BOČNÍ POHLED NA PROPOJENÍ JEDNOTLIVÝCH BLOKŮ VÝPOČETNÍHO MODULU	41
OBRÁZEK 7.1 – KOREKCE VYPOČTENÉ RYCHLOSTI VOZIDLA.....	43
OBRÁZEK 8.1 – SCHÉMA ZAPOJENÍ MĚŘÍČÍHO PRACOVNÍHO MÍSTE V LABORATORNÍCH PODMÍNKÁCH	53
OBRÁZEK 8.2 – GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI TEORETICKY VYPOČÍTANÉ RYCHLOSTI A RYCHLOSTI VYPOČTENÉ NAVRŽENÝM MODULEM	55
OBRÁZEK 8.3 – GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI ROZDÍLU TEORETICKY VYPOČTENÉ RYCHLOSTI A RYCHLOSTI VYPOČTENÉ MODULEM NA KMITOČTU ZÁZNĚJOVÉHO SIGNÁLU	56
OBRÁZEK 8.4 – GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI VYPOČTENÉ RYCHLOSTI NA ROZKMITU ZÁZNĚJOVÉHO SIGNÁLU.....	57

Seznam tabulek

TABULKA 4.1 – VLASTNOSTI AD PŘEVODNÍKU AD7492.....	16
TABULKA 4.2 – PROPOJENÍ AD7492 S MIKROPROCESOREM	19
TABULKA 4.3 – ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI OBVODU MAX3232	21
TABULKA 4.4 - PROPOJENÍ MAX3232 S MIKROPROCESOREM.....	23
TABULKA 4.5 – ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI OBVODU ATMEGA2560	24
TABULKA 8.1 – ZÁVISLOST VYPOČTENÉHO KMITOČTU NA VELIKOSTI KMITOČTU ZÁZNĚJOVÉHO SIGNÁLU	54
TABULKA 8.2 – ZÁVISLOST VYPOČTENÉHO KMITOČTU NA VELIKOSTI AMPLITUDY ZÁZNĚJOVÉHO SIGNÁLU	57
TABULKA 8.3 – ZÁVISLOST VYPOČTENÉHO KMITOČTU PRO RŮZNÉ PRŮBĚHY ZÁZNĚJOVÉHO SIGNÁLU NA VELIKOSTI AMPLITUDY ZÁZNĚJOVÉHO SIGNÁLU	58
TABULKA 8.4 – ODBĚR BLOKŮ MODULU ZPRACOVÁNÍ DAT ZÁZNĚJOVÉHO KMITOČTU	61

Úvod

Měření rychlosti objektů prostřednictvím dopravních radarů je nejlépe proveditelné využitím Dopplerova jevu. Celá metoda měření rychlosti spadá do oboru radiolokace, neboť cílem této disciplíny je zjišťování polohy objektů a zjišťování parametrů jejich pohybu.

Tato práce pojednává o měření rychlosti za použití aktivního radiolokátoru, neboť vyvíjené zařízení prostřednictvím vysílací antény ozáří cíl elektromagnetickou vlnou, která je po odrazu od cíle opět přijata prostřednictvím přijímací antény. Z naměřených hodnot odraženého signálu jsou určeny parametry rychlosti cílového objektu.

V této práci je proveden návrh schéma zapojení zařízení a desek plošných spojů části radaru sloužící pro zpracování záznějových radarových signálů, dále je proveden návrh schéma zapojení obvodů zpracování vstupního záznějového signálu. Je zde vyvinut řídicí program procesoru pro zpracování záznějového signálu radaru.

1. Rozdělení detektorů dopravních RADARů

V této kapitole je uvedeno technologické rozdělení senzorů nedestruktivních detektorů. Jedná se o detektory, které se instalují bez zásahu do vozovky, dají se snadno sejmut a přemístit. Fungují bezdotykově.

1.1 Mikrovlnné detektory

Mikrovlnné radary byly vyvinuty za druhé světové války pro detekci objektů. Zkratka RADAR vlastně znamená **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging. Tyto radary užívají kmitočty 1 GHz až 30 GHz a vlnové délky těchto signálů jsou 1 cm až 30 cm. Tyto radary jsou schopny detekovat rychlost, počet a maximálně tři druhy velikosti vozidel.

1.1.1 Dopplerův radar

Tento radar vysílá signál o konstantní frekvenci. Podle Dopplerova principu je pohybem vozidel způsobena změna kmitočtu odraženého signálu. Z principu vyplývá nemožnost zjištění stojících vozidel (nulový pohyb nezpůsobuje změnu kmitočtu měřícího signálu). Radary založené na tomto principu obvykle měří rychlost vozidel v rozsahu 3 kmh⁻¹ až 150 kmh⁻¹, vzdálenost měření bývá 2 m až 25 m a přijímací úhel bývá okolo 7°.

1.1.2 Radar s frekvenčně modulovanými spojitými vlnami FMCW

FMCW (Frequency Modulated Continuous Waves) radary rovnoměrně mění kmitočet měřícího signálu, díky tomuto jsou schopny detekovat i přítomnost stojících vozidel.

1.1.3 Vlastnosti mikrovlnných radarů

Výhody

- nejsou citlivé na špatné počasí
- mohou pracovat za denního světla i za tmy
- jsou vhodné pro měření rychlosti ve více pruzích vozovky

Nevýhody

- Dopplerovský radar nedetekuje stojící vozidla (má-li být rychlost měřena za jízdy, je nutný rozdíl rychlostí obou vozidel)
- radary jsou nevhodné pro sčítání vozidel
- při instalaci na okraji vozovky mohou být některá vozidla v radiovém stínu a tedy může dojít k úniku informací o jejich rychlosti

1.2 Infračervené detektory

Využívají element citlivý na světlo, který mění odraženou či přijatou energii na elektrický signál. Umožňují real-time zpracování dat. Tyto detektory lze využít pro řízení křižovatek, stanovení intenzity dopravy, měření rychlosti vozidel, detekce vozidel, detekce chodců na přechodech, vytváření 2D či 3D modelů vozidel apod. Rozdělují se na aktivní a pasivní.

1.2.1 Aktivní

Tyto detektory pracují se zářením o vlnových délkách okolo 850 nm, tedy se zářením, které je velice blízké infračervenému záření. Laserové diody zářiče osvětlují detekční zónu vlnami o nízké úrovni energie. Odražené infračervené záření je pak přijato optickým systémem, který využívá materiálů citlivých na dopad infračerveného záření. Tyto detektory jsou nelineární, mají totiž zvýšenou citlivost v oblasti 1,3 m od zářiče, musí se proto provádět korekce. Velikost podílu odraženého záření závisí na odrazivosti povrchu (například matně černá kapota vozidla odráží cca 10 % dopadajícího záření). Jelikož zařízení může vysílat i více paprsků, je schopno měřit rychlost vozidel.

Výhodou těchto detektorů je schopnost pracovat jak za denního světla tak i za tmy, kvalita zjištěných dat je však závislá na hustotě mlhy či sněhové vánice. Je-li takovýto detektor nevhodně nainstalován, může dojít k zastínění a tedy k nedetekování některých projíždějících vozidel.

1.2.2 Pasivní

Pomocí pasivních IR detektorů se měří délka vozidel, intenzita provozu a umožňují detekci vozidel. Principiálně je detektor založen na přijímání energie, kterou emitují projíždějící vozidla, neboť veškeré objekty, jejichž teplota není absolutní nula, vyzařují energii. Tyto detektory pracují se zářením o vlnových délkách 8 μm až 14 μm , toto záření se již nachází hluboko ve spektru infračervených záření. Volbou takovýchto vlnových délek záření se minimalizuje vliv slunečního záření, změny intenzity osvětlení apod., detektory zaznamenávají změnu energie při průjezdu vozidla – tento signál je úměrný rozdílu emisivit a teplot vozovky a projíždějícího vozidla.

Tyto detektory umožňují měření rychlosti vozidel (systém s více zónami) a jejich činnost není závislá na denní době (pracují ve dne i v noci). Nevýhodou je složitá kalibrace a skutečnost, že výkon záření emitovaného vozidlem je ovlivněn změnami teplot a prouděním vzduchu.

1.3 Ultrazvukové detektory

Ultrazvukové detektory se používají pro určení počtu vozidel, přítomnosti vozidel, délky a výšky vozidel. Jsou založeny na principu vysílání tlakových vln zvukové energie. Pracují v rozmezí kmitočtů 25 kHz až 50 kHz. Vysílané vlny mají zpravidla pulsní charakter. Detektory měří jednak dobu návratu odražené vlny a jednak velikost příchozí odražené vlny. Ve většině případů vysílají ultrazvukové vlny dvěma směry, mezi nimiž je přesně definovaný úhel pro měření rychlosti vozidel. Z důvodu nižší přesnosti se však nepoužívají příliš často.

Výhodou ultrazvukových detektorů je možnost aplikování na více jízdních pruhů. Nevýhodou je možnost změny vlastností vlivem změny teploty nebo extrémními poryvy větru. Dlouhé intervaly mezi vysílanými pulsy mohou ovlivnit přesnost měření vyšších rychlostí vozidel.

1.4 Kombinované detektory

Pracují na principu detekce kombinace technologií mikrovln, ultrazvuku a infračerveného záření.

Lze pomocí nich zjistit rychlost jednotlivých vozidel, počet vozidel, indikovat přítomnost vozidla a dopravní zácpy, obsazení a časový odstup vozidel.

2. Princip aktivního radiolokátoru

Tato část práce pojednává o formulaci Dopplerova principu, obecném principu dopplerovského radaru a radiolokační rovnici.

2.1 Dopplerův princip

Rakouský fyzik, astronom a matematik Christian Andreas Doppler (29. 11. 1803 - 17. 3. 1853) uskutečnil roku 1845 pokus dokazující tzv. Dopplerův posun (Dopplerův jev).

Dopplerův princip popisuje změnu vlnové délky vlnění v závislosti na vzájemném pohybu pozorovatele a zdroje vlnění. V Dopplerově době se jev uplatňoval především v akustice. Ve 20. století však Dopplerův jev přinesl revoluci v astrofyzice.

2.2 Mikrovlnné radarové senzory pro detekci a určení velikosti pohybu pomocí Dopplerova jevu

Tyto senzory jsou citlivější než infrapasivní senzory a navíc umožňují konstrukci systémů s více hlavicemi, které umožňují i určení polohy objektu. Tyto radary jsou však finančně nákladnější, neboť cena snímacích čidel se pohybuje řádově v tisících korun. Senzory vysílají elektromagnetická záření nepřetržitě. Kmitočet vysílaného elektromagnetického záření používaného pro detekci pohybu a určení rychlosti objektů se volí z hodnot 2,45 GHz, 9,35 GHz, 10,525 GHz nebo 24,125 GHz. Jádrem oscilátoru je Gunnova dioda, anténa je jednoduchá “patch“ anténa. Přijatý odražený signál je směřován s vysílaným signálem na Schottkyho diodě. Dochází-li k odrazu na pohybujícím se objektu, dochází vlivem Dopplerova jevu ke vzniku rozdílového kmitočtu (záznějový signál). Tento signál je zpracováván dalšími obvody, jejichž výstupem jsou konkrétní informace o rychlosti, případně poloze či podobných vlastnostech objektu.

2.3 Radiolokační rovnice

Radiolokační rovnice udává základní chování radaru. Následně bude odvozena radiolokační rovnice za předpokladu homogenního a průhledného prostředí, které odpovídá podmínkám pro ideální rádiový přenos. Druhým předpokladem je existence pouze jediné dráhy šíření elektromagnetické vlny mezi radarem a objektem, jehož rychlost je zjišťována.

Odvození radiolokační rovnice :

Π_1 – hustota energie generované vysílačem radaru v místě cíle

Π_2 - hustota energie odraženého záření cílem v místě přijímací antény radaru

S_C – plocha reprezentující odrazové vlastnosti cíle

P_C – výkon elektromagnetického signálu odražený cílem

P_1 – výkon vysílaného signálu

P_2 – výkon odraženého signálu na vstupu přijímače

D – činitel směrovosti cíle

R – vzdálenost radaru a cíle

A_2 – účinná plocha přijímací antény

η_1 – účinnost antény a ztráty napáječe vysílací části

η_2 – účinnost antény a ztráty napáječe mezi anténou a přijímačem

G_1 – zisk vysílací antény

P_{N_SUM} – celkový šumový výkon lineární části přijímače

B_N – šumová šířka pásma

k – Boltzmannova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$)

T_0 – skutečná termodynamická teplota zdroje signálu (K)

F – šumové číslo přijímače

C/N – odstup signál/šum na vstupu přijímače

Hustota energie v místě cíle :

$$\Pi_1 = \frac{P_1 G_1 \eta_1}{4\pi R^2} \quad (2.1)$$

Cílem odražený výkon elektromagnetického signálu :

$$P_C = S_C \Pi_1 = \frac{S_C P_1 G_1 \eta_1}{4\pi R^2} \quad (2.2)$$

Hustota energie v místě přijímací antény :

$$\Pi_2 = \frac{P_C}{4\pi R^2} D = \frac{S_C D P_1 G_1 \eta_1}{16\pi^2 R^4} \quad (2.3)$$

Výkon odraženého elektromagnetického signálu v místě vstupu přijímače :

$$P_2 = \Pi_2 A_2 \eta_2 = \frac{S_C D P_1 G_1 A_2 \eta_1 \eta_2}{16\pi^2 R^4} \quad (2.4)$$

Radiolokační rovnice :

$$P_2 = \frac{S_C D P_1 G_1 A_2 \eta_1 \eta_2}{16\pi^2 R^2} = \frac{S_C D P_1 G_1 \lambda^2 \eta_1 \eta_2}{64\pi^3 R^2} \quad (2.5)$$

Celkový šumový výkon lineární části přijímače za podmínek jeho výkonového přizpůsobení antény na přijímač :

$$P_{N_SUM} = (n + F - 1) k T_0 B_N \quad (2.6)$$

Pro velmi vysoké kmitočty je n rovno jedné, tedy vztah (2.6) přejde na tvar :

$$P_{N_SUM} = F k T_0 B_N \quad (2.7)$$

Výkonový odstup signálu od šumu na vstupu přijímače je dán vztahem :

$$\frac{C}{N} = \frac{P_2}{P_{N_SUM}} = \frac{P_1 \eta_1 \eta_2 D S_C \lambda^2}{64\pi^3 R^4 F k T_0 B_N} \quad (2.8)$$

2.4 Maximální dosah radiolokátoru

Následující rovnici uvažujeme za stejných nároků na prostředí, ve kterém se elektromagnetické vlny šíří, jako pro prostředí při odvození radiolokační rovnice v bodě 2.3.

Maximální dosah radiolokátoru za předpokladu společné přijímací a vysílací antény :

$$r_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_1 S^2 S_c D}{4\pi\lambda^2 P_{\min}}} = \sqrt[4]{\frac{P_1}{P_{\min}} \cdot \frac{\lambda^2}{64\pi^3} \cdot DD_V D_P S_c} \quad (2.9)$$

kde :

D – činitel směrovosti cíle

$P_{\min}$ – citlivost přijímače

S – efektivní plocha antény

D_V, D_P - zisk vysílací a přijímací antény

2.5 Určení rychlosti objektu ze záznějového signálu

Je použit radar založený na principu dopplerova jevu. Radar k cíli vysílá vysokofrekvenční signál. Záznějový kmitočet je roven rozdílu kmitočtů přijatého elektromagnetického signálu a kmitočtu vysílaného signálu. Tento záznějový kmitočet je získáván prostřednictvím senzorů se dvěma směšovači.

Ve směšovači dochází k sloučení vysílaného a přijímaného signálu s výsledkem je záznějový signál. Rychlost cíle se pak vypočte z kmitočtu záznějového signálu.

Odvození vztahu pro výpočet záznějového kmitočtu. Pro kmitočet odraženého signálu platí v místě přijímací antény radaru vztah :

$$f_p = f_v \sqrt{1 - \left(\frac{2v}{c}\right)^2} \quad (2.10)$$

Po rozkladu odmocniny do Taylorovy řady lze příliš malé členy této řady zanedbat. Zůstane tedy vztah :

$$f_p \cong f_v \left(1 - \frac{2v}{c}\right) \quad (2.11)$$

Záznějový kmitočet je pak roven :

$$\Delta f = f_v - f_p = f_v - f_v \left(1 - \frac{2v}{c}\right) = f_v \frac{2v}{c} \quad (2.12)$$

Rychlost objektu se poté určí ze vztahu :

$$v = \frac{c\Delta f}{2f_v} \quad (2.13)$$

3. Rozbor jednotlivých částí radaru

V této části je proveden rozbor dopplerovského radaru dle funkce jednotlivých bloků. Jedná se o tyto moduly :

- vysokofrekvenční modul
- výpočetní modul
- zobrazovací modul

3.1 Vysokofrekvenční modul

Jedná se o přijímací a vysílací anténu (senzor), zdroj vysokofrekvenčního signálu (oscilátor, případně součást senzoru), směšovač pro sloučení přijatého odraženého signálu a referenčního signálu zdroje (oscilátoru). Na výstupu směšovače se nachází zašuměný signál odpovídající záznejovému signálu. Anténa může být společná pro vysílání a příjem nebo může jít o dvě separované antény (jedna anténa vysílací a druhá přijímací).

Na vysokofrekvenční části záleží :

- oblast přehledování
- druh použité modulace
- výkon vysílače
- citlivost přijímače
- atd

3.2 Výpočetní modul

V tomto modulu dochází ke zpracování záznejového signálu z výstupu směšovače ve vysokofrekvenční části.

Signál z tohoto směšovače prochází dalšími obvody pro úpravu parametrů tohoto signálu – impedanční přizpůsobení jednotlivých částí radaru, přizpůsobení úrovní signálů jednotlivých modulů.

Za vstupními přizpůsobovacími obvody se nachází blok AD převodníku pro převod analogové hodnoty na hodnotu digitální určenou k číslicovému zpracování.

Číslicové zpracování je realizováno mikrokontrolérem. Nejprve je potřeba ze zašuměného signálu získat velikost záznejového signálu. Toto se nejlépe realizuje prostřednictvím rychlé Fourierovy transformace (dále jen FFT), neboť po provedení FFT nad skupinou digitálních vzorků zašuměného signálu je jejím výsledkem kmitočtové spektrum původního signálu znehodnoceného šumem. Při takové úrovni šumu, kdy ještě nedochází k prudkému nárůstu okolních spektrálních složek nad mez rozlišení záznejového kmitočtu a těchto “parazitních“ kmitočtů, je harmonická složka spektra s nejvyšší amplitudou rovna záznejovému signálu. Viz simulace pomocí programu MatLab, jejíž výsledky jsou demonstrovány v *Příloze 5*.

Hodnoty všech zpracovávaných vzorků a hodnoty konstant potřebných pro výpočet FFT (například výsledky funkce sinus a kosinus pro výpočet FFT prostřednictvím “motýlků“) jsou uloženy v paměti RAM, kde jsou pro mikrokontrolér k dispozici.

Po získání kmitočtu záznejového signálu je nutno provést výpočet vlastní rychlosti objektu, a sice dle finálního vzorce kapitoly 1.5.

Po ukončení výpočtu na základě aktuálních hodnot vzorků signálu z vysokofrekvenční části je získaný výsledek předán k zobrazení následujícímu modulu. Po předání výsledků matematických operací je načtena nová posloupnost vzorků pro výpočet rychlosti. Součástí matematických operací je však ještě korekce velikosti zjištěné rychlosti z důvodu odchýlení radaru od osy, ve které se pohybuje objekt.

3.3 Zobrazovací modul

Tento modul je možno připojit k výpočetnímu modulu prostřednictvím rozhraní RS232. Prostřednictvím tohoto rozhraní jsou výstupní data výpočetního modulu (rychlost pohybu objektu) předána modulu určenému pro prezentování výsledků matematických operací.

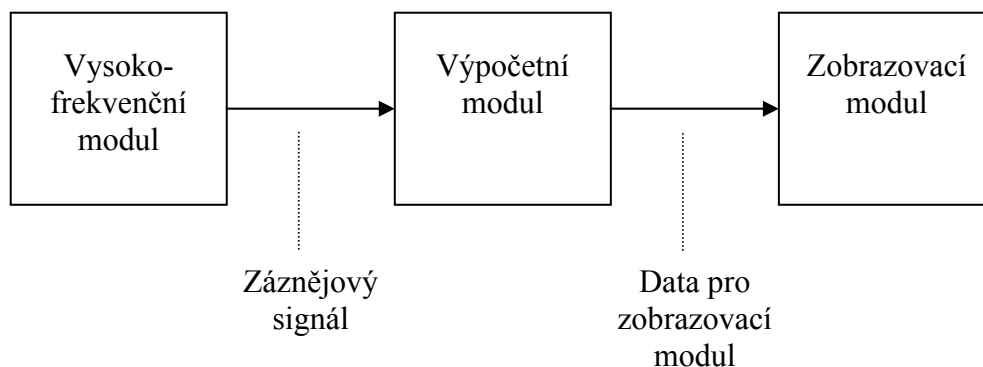
Komunikace probíhá jednosměrně režimem MASTER (výpočetní modul) – SLAVE (zobrazovací modul) s potvrzováním dat.

V dalším textu jsou probrány standardy rozhraní RS232.

4. Vlastní návrh výpočetní části dopplerovského radaru

Předmětem návrhu je realizace výpočetního modulu dopplerovského radaru. Hlavní kritérium pro výběr obvodů je kmitočet vzorkování záznějového signálu, počet vstupně výstupních bran procesoru a výpočetní výkon mikroprocesoru udávající délku trvání výpočtu rychlosti vozidla z naměřených vzorků. Velikost dočasné paměti pro odkládání vzorků a počet bitů pro reprezentaci jednoho vzorku.

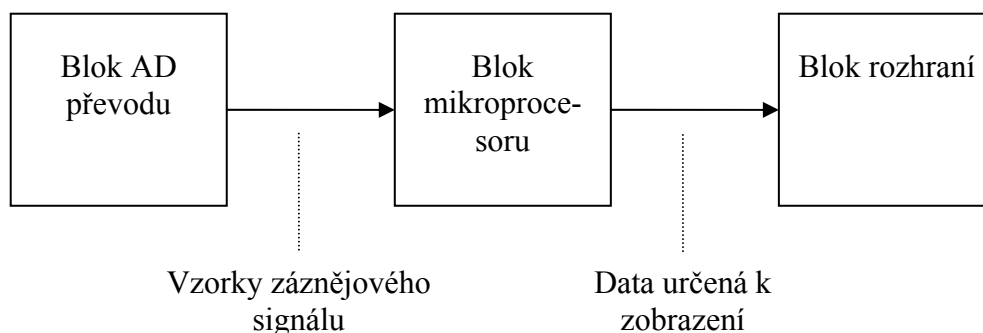
Na vstupu navrhovaného bloku se nachází záznějový signál z vysokofrekvenčního modulu, na výstupu tohoto bloku se nacházejí data pro zobrazovací modul. Situace je znázorněna na *obrázku 4.1*.



Obrázek 4.1 – Propojení výpočetního modulu s okolními moduly

Vlastní výpočetní modul lze podle funkce rozdělit na tři dílčí části, jejich vzájemné propojení je patrné dle *obrázku 4.2*. Jedná se o tyto části :

- Blok AD převodu
- Blok vlastní výpočetní jednotky – blok mikroprocesoru
- Blok rozhraní pro komunikaci se zobrazovacím modulem či jiným připojeným zařízením



Obrázek 4.2 – Propojení dílčích bloků výpočetního modulu

4.1 Blok AD převodu

Tento blok má za úkol ze vstupního analogového záznějového signálu odebírat vzorky, které po ukončení převodu do digitální reprezentace poskytne prostřednictvím paralelní sběrnice bloku mikroprocesoru k dalšímu zpracování.

4.1.1 Kritéria výběru AD převodníku

Jádrem tohoto bloku je tedy AD převodník. Výběr AD převodníku pro konverzi analogového záznamového signálu do digitální formy je limitován :

- Maximálním kmitočtem převodu
- Počtem bitů digitálního slova

Analogově/digitální převodníky bývají z hlediska výstupních digitálních dat vyráběny jako sériové nebo paralelní. Pro tuto aplikaci je vhodnější AD převodník s paralelním digitálním slovem na výstupu, neboť komunikace s ním je rychlejší a nezabere tolik výpočetního výkonu jako komunikace sériovou linkou.

Z hlediska počtu bitů jsou nejčastěji k dispozici převodníky s počtem bitů :

- 8 bitové
- 10 bitové
- 12 bitové
- 16 bitové

Nejrozšířenější mikroprocesory pro jednočipové aplikace mají 8 bitovou vnitřní datovou sběrnici. Vyrábějí se i varianty, které mají šířku zpracovatelného slova 16 bitů či 20 bitů, ale pro tuto aplikaci se použije 8 bitového mikroprocesoru. Vzhledem k tomu, že v bloku mikroprocesoru je použit 8 bitový mikroprocesor, nabízí se využít 8 bitový DA převodník. Jelikož je koncepce výpočetního modulu pojata stavebnicově (možnost změny kteréhokoliv bloku bez nutnosti změny dalších bloků tohoto modulu), byl zvolen 12ti bitový AD převodník. Vzhledem k výkonnosti současných mikroprocesorů však není problém použít 8 bitový mikroprocesor pro zpracování hodnot ve formátu double natož 12 bitových vzorků typu integer.

Dalším omezením je velikost napájecího napětí obvodu, které má být nejlépe +5 V, v krajním případě může být toto napájecí napětí +3,3 V.

Posledním kritériem je mezní kmitočet převodu. Jestliže se bude rychlost vypočítávat z 512 vzorků a doba mezi odběrem dvou vzorků z AD převodníku je maximálně 125 μs včetně uložení tohoto vzorku do paměti dat. Potom je tedy nejnižší možný počet vzorků za 1 s :

$$f_{SPS_MIN} = \frac{1}{\text{doba převodu jednoho vzorku}} = \frac{1}{125 \cdot 10^{-6}} = 8000 \text{ SPS}$$

V nejhorším uvažovaném případě ukládání 512 vzorků, kde doba převodu jednoho vzorku je 10 μs a doba ukládání jednoho vzorku je 125 μs je potom :

$$t_{ukládání_max} = \{512 \cdot 125 \cdot 10^{-6}\} = 64 \text{ ms}$$

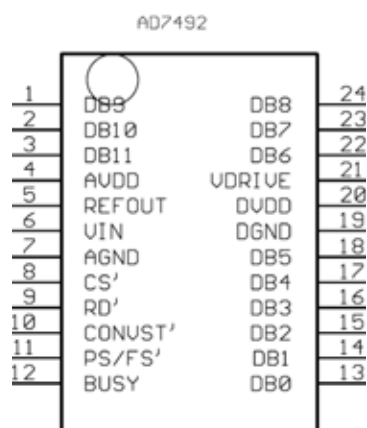
4.1.2 Vlastnosti vybraného AD převodníku

Na základě výše uvedených kritérií byl zvolen AD převodník firmy Analog Devices, konkrétně typ AD7492AR, jehož základní parametry jsou udány *tabulkou 4.1*.

Tabulka 4.1 – Vlastnosti AD převodníku AD7492

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	2.7 až 5.25 V
Počet převodů (za 1s)	1 MSPS
Rozlišení (počet bitů převodu)	12
CLK oscilátor	interní
Referenční napětí	interní
Formát výstupních dat	paralelní
Typ pouzdra	SOIC24

Pohled na vybraný AD převodník je na *obrázku 4.3*, kde je zachyceno i rozložení pinů.



Obrázek 4.3 – Schéma AD7492 včetně rozložení linek

Pro komunikaci s mikroprocesorem je použito řídicí a datové sběrnice. Datová sběrnice je 12 bitová a je celá přivedena na porty mikroprocesoru (viz níže). Význam jednotlivých signálů řídicí sběrnice :

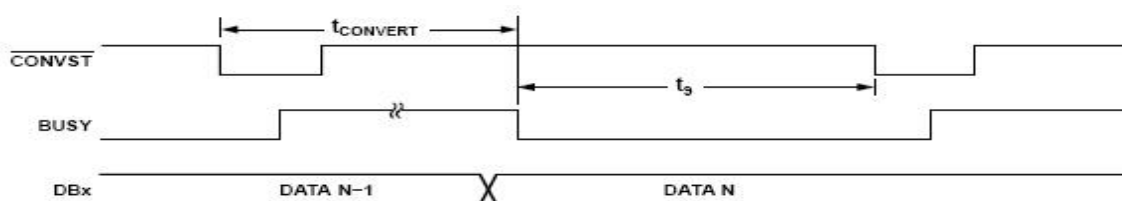
- CS' (input) - Výběr obvodu, je-li signál v úrovni L je obvod vybrán a převodník může pracovat. Aktivuje výstupní zesilovače. Může být trvale nastaven do L.
- RD' (input) - Signál pro čtení dat. Na spádovou hranu tohoto signálu se na datovou sběrnici zapíší platná data dokončeného převodu. Signál může být trvale nastaven do L, potom budou aktuální data převodu zapisována okamžitě po provedení převodu na datovou sběrnici
- CONVST' (input) - Začátek převodu. Během spádové hrany tohoto signálu vstupní track/hold zesilovače přecházejí ze stavu track do stavu hold; ke puštění převodu postačí impuls o době trvání 10 ns
- PS/FS' (input) - Slouží pro nastavení sleep módu, který nastává, je-li i po ukončení převodu signál CONVST' v úrovni L; v částečném sleep módu (partial sleep = PS) nejsou obvody interního oscilátoru a interní reference napájeny a spotřeba se sníží na 250 μ A, v úplném sleep módu (full sleep = FS) vnitřní analogové obvody nejsou napájeny
- BUSY (output) – Logická indikace stavu probíhajícího převodu; tento signál je nastaven do H sestupnou hranou signálu CONVST' a po celou dobu

převodu zůstane v úrovni H, po skončení procesu převodu a zápisu nově převedených dat do výstupního registru je úroveň tohoto signálu nastavena na L; pokud je během spádové hrany tohoto signálu úroveň start signálu CONVST' v úrovni L, přechází obvod do sleep módu.

Význam zbylých pinů AD převodníku :

- DB0..DB11 – 12 bitová datová sběrnice
- AV_{DD} – napájení analogových obvodů převodníku (2,7 V až 5,25 V)
- REF OUT – výstup referenčního napětí ($2,5\text{ V} \pm 1\%$)
- V_{IN} – analogový vstup; rozsah vstupního napětí je 0 V až REFIN
- AGND – zemní referenční potenciál pro všechny analogové obvody v převodníku
- DGND – zemní referenční potenciál pro všechny digitální obvody v převodníku
- DV_{DD} – napájení digitálních obvodů převodníku (2,7 V až 5,25 V)
- Vdrive – napájecí napětí digitálních vstupních a výstupních obvodů – velikost tohoto napětí určuje velikost úrovně H na vstupu a výstupu digitálních bran.

Příklad komunikace je naznačen na *obrázku 4.4*, předpokladem je trvalé nastavení CS' a RD' do úrovně L :



Obrázek 4.4 – Komunikace s AD převodníkem AD7492, převzato z [8]

4.1.3 Volba zapojení bloku AD převodníku

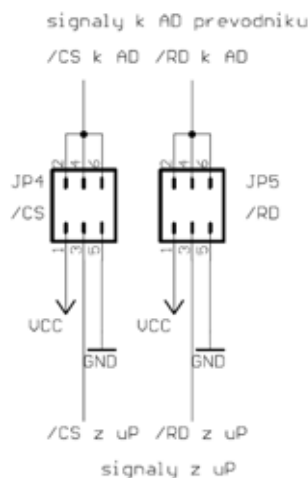
Kompletní schéma zapojení tohoto bloku se nachází v *příloze 1*, kompletní osazovací plány a předlohy pro výrobu desek plošných spojů se nacházejí v *příloze 2*.

Schéma zapojení bloku AD převodníku obsahuje hlavní prvek – převodník AD7492 v základním zapojení a jednoduchými obvody pro nastavení funkce převodníku, rozvodu signálů a kondenzátorů pro vyhlazení napájecích napětí.

Vstupní analogový záznějový signál je přiveden na pin 6 převodníku AD7492, prostřednictvím třípinového konektoru (JP3), kde na dva krajní piny je přiveden zemní potenciál a prostředním pinem je přiváděn záznějový signál nebo případně prostřednictvím stíněného kabelu připojeného co nejbližší pinu převodníku. Tímto je blok propojen s vysokofrekvenční částí, stejně jako dva dvoupólové konektory (JP7 a JP12), které mají pin 1 přiveden na zemní potenciál a pin 2 přiveden na napájecí napětí.

Nastavení některých signálů AD převodníku se realizuje prostřednictvím jumperů, kde je možno navolit, zda daný řídicí signál bude nastaven na úroveň L, H nebo zda bude řízen mikroprocesorem prostřednictvím systémové sběrnice. Takto nastavit lze

signály CS' a RD'. Na *obrázku 4.5* je znázorněno zapojení jumperů pro nastavení těchto signálů.



Obrázek 4.5 – Nastavení signálů CS', RD' a PS/FS'

Vzdálenost mikroprocesoru a AD převodníku je minimální (jen několik cm). Proto není použito posilovacích a oddělovacích obvodů například 74HC244 (74HC245). Piny převodníku jsou tedy připojeny přímo k pinům mikroprocesoru.

4.1.4 Propojení bloku AD převodníku s blokem mikroprocesoru

Kompletní popis systémové sběrnice se nachází v *příloze 3*, zde je uvedeno pouze propojení signálů bloku mikrokontroléru se signály bloku AD převodníku. Jak je upřesněno níže (*tabulkou 4.2*) je blok AD převodníku napájen konektory B a D a jeho datová a řídicí sběrnice je přivedena k mikroprocesoru prostřednictvím konektoru C. Konektor A blok AD převodníku nevyužívá vůbec. Propojení jednotlivých signálů je patrné z *tabulky 4.2* :

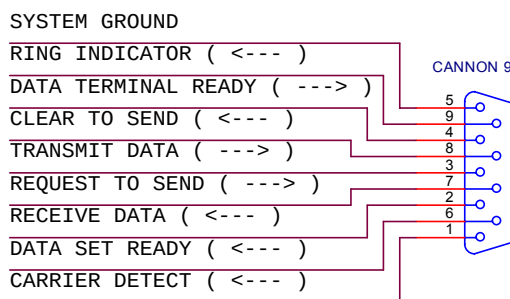
Tabulka 4.2 – Propojení AD7492 s mikroprocesorem

Konektor	Číslo pinu	Pin mikroprocesoru	Pin na desce AD převodníku
B	9	GND	GND
B	10	GND	GND
B	11	+5V	+5V
B	12	+5V	+5V
C	1	D6	DB06
C	2	D7	DB07
C	3	D4	DB04
C	4	D5	DB05
C	5	D2	DB02
C	6	D3	DB03
C	7	D0	DB00
C	8	D1	DB01
C	13	L2	DB10
C	14	L3	DB11
C	15	L0	DB08
C	16	L1	DB09
C	19	G4	BUSY
C	21	G2	CONVST
C	22	G3	PS/FS
C	23	G0	CS
C	24	G1	RD
D	9	GND	GND
D	10	GND	GND
D	11	+5V	+5V
D	12	+5V	+5V

4.2 Blok rozhraní

Úkolem tohoto bloku je předat zobrazovacímu modulu prostřednictvím sériové sběrnice RS232 data, která jsou výsledkem výpočtu v bloku mikroprocesoru. Pro toto rozhraní realizující RS232 nejsou takové nároky jako při volbě AD převodníku. Jedná o standardizované obvody a komunikační protokol je mezi jejich výstupem a zobrazovacím modulem přesně definován.

4.2.1 Sériové rozhraní RS232 – základní informace



Obrázek 4.6 - Rozložení linek na 9ti pinovém konektoru CANNON

Toto rozhraní bylo původně určeno pro sériovou komunikaci s periférií na vzdálenost 20m. Používají se dva typy konektorů – 9ti pinový (rozložení linek viz *Obrázek 4.6*) a 25ti pinový, který využívá stejné signály, dnes se však již téměř nepoužívá. Větší odolnost rušení je zajištěna prostřednictvím větších napěťových úrovní signálů ($L = +5V$ až $+15V$, $H = -5V$ až $-15V$).

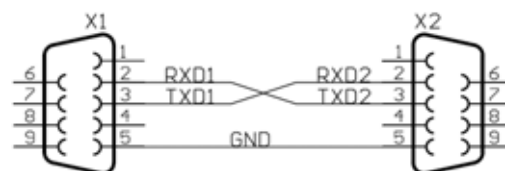
Pro připojení k zařízení pracujícího na úrovni TTL logiky je potřeba připojit převodník napěťových úrovní signálů (například obvod MAX232, LT1180, UM8250,). Komunikace může probíhat buď synchronně nebo asynchronně různou rychlostí podle nakonfigurování řídicích registrů přijímače a vysílače. Součástí řídicích registrů je také nastavování START, STOP a paritních bitů.

RS232 je rozhraní, jehož využívání je v dnešní době již na ústupu oproti novějším a rychlejší rozhraním.

4.2.2 Výběr a vlastnosti obvodu pro realizaci rozhraní RS232

Na trhu je v současné době k dispozici mnoho druhů integrovaných obvodů, které po doplnění minimálního počtu externích součástek realizují konverzi úrovní přenášených dat na formát odpovídající standardu RS232.

Byl vybrán obvod MAX232CWE firmy MAXIM. Jedná se o obvod realizující konverzi dvou kanálů RS232, ne však všech signálů, které jsou patrné z *obrázku 4.8*, ale pouze signály pro tzv. nulový modem. Nulový modem je případ zapojení RS232, kdy jsou použity pouze linky RxD, TxD a GND, zbytek je podle potřeby propojen na straně vysílače (respektive přijímače) nebo není využit vůbec. Ošetření nepřenášených signálů záleží na typu komunikace, zda-li s těmito signály počítá či nikoli. Schéma zapojení nulového modemu je na *obrázku 4.7*.



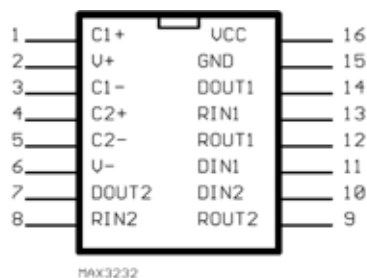
Obrázek 4.7 – Propojení linek nulového modemu

Zvolený obvod tedy realizuje konverzi dvou kanálů RS232 v úrovních TTL na úroveň odpovídající RS232. Při komunikaci dle obrázku 4.9 nelze realizovat tzv. handshaking nebo komunikaci s potvrzováním. Základní parametry zvoleného obvodu jsou shrnuty v tabulce 4.3.

Tabulka 4.3 – základní vlastnosti obvodu MAX3232

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	3 V až 5.5 V
Přenášená data	250kbits ⁻¹
Počet kanálů	2
Velikost externích kondenzátorů	4 x 0.1 μ F

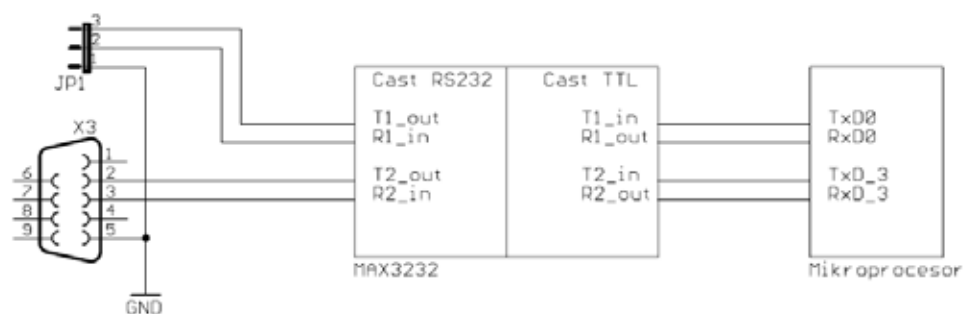
Obvod MAX3232 je rozšířená, komerčně vyráběná varianta realizující převod dat do standardu RS232. Na obrázku 4.8 je pohled na obvod MAX3232 včetně rozložení linek :



Obrázek 4.8 – Schéma MAX3232 včetně rozložení linek

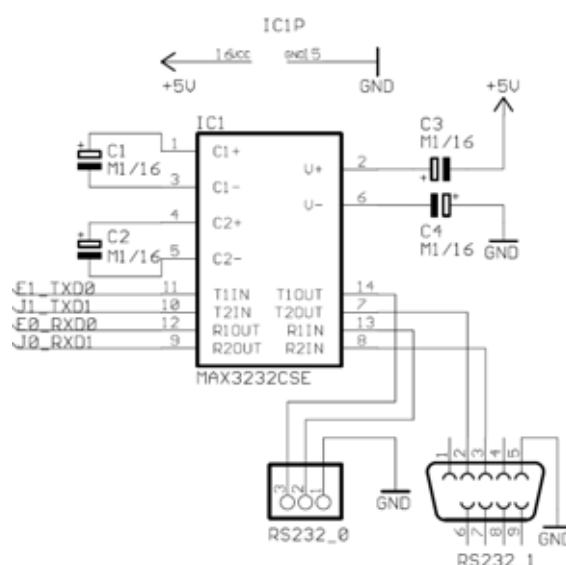
4.2.3 Zapojení obvodu MAX3232

Z výše uvedeného vyplývá, že obvod je připojen k mikroprocesoru prostřednictvím dvakrát dvou párů linek, tedy prostřednictvím dvou linek sériového rozhraní RS232. Tyto rozhraní jsou na straně mikroprocesoru připojeny k pinům, jejichž alternativní funkce je přímo generování dat pro takovýto převodník TTL → RS232 (celkového počtu bitů, včetně paritních bitů, počtu stop bitů, bitové a baudové rychlosti, apod). Připojení sériových linek o parametrech dat odpovídajících standardu RS232 ke konektorům je takové, že linka číslo 2 je vyvedena na klasický 9 pinový konektor CANNON 9, zatímco linka číslo 1 je vyvedena prostřednictvím třípinového konektoru. U obou linek jsou vyvedeny pouze signály RxD, TxD GND, pouze u linky číslo 2 jsou tyto signály přivedeny na rozměrný konektor CANNON 9. Toto zapojení je znázorněno na obrázku 4.9.



Obrázek 4.9 – Zapojení obvodu MAX3232 mezi mikroprocesor a konektory

Celkové zapojení obvodu MAX3232 odpovídá katalogovému doporučení a je patrné z obrázku 4.10. Napájení obvodu činí 5 V.



Obrázek 4.10 - Katalogové zapojení obvodu MAX3232

4.2.4 Propojení bloku rozhraní s blokem mikroprocesoru

Kompletní schéma zapojení bloku rozhraní se nachází v příloze 1, osazovací schémata a předlohy pro výrobu desek plošných spojů se nacházejí v příloze 2. Kompletní popis systémové sběrnice a propojení všech desek plošných spojů se nachází v příloze 3. Z tabulky 4.4 je patrné, jak jsou vzájemně propojeny desky plošných spojů bloku mikroprocesoru a bloku rozhraní. Z tabulky je patrné, že blok rozhraní vůbec nevyužívá konektor C.

Tabulka 4.4 - Propojení MAX3232 s mikroprocesorem

Konektor	Číslo pinu	Pin desky mikroprocesoru	Pin na desce rozhraní
B	7	J1	TXD1
B	8	J0	RXD1
B	9	GND	GND
B	10	GND	GND
B	11	+5V	+5V
B	12	+5V	+5V
D	9	GND	GND
D	10	GND	GND
D	11	+5V	+5V
D	12	+5V	+5V
D	19	E0	RXD0
D	20	E1	TXD0

4.3 Blok mikroprocesoru

Tento blok tvoří jádro celého systému. Zde jsou zpracovávána data ze vstupního bloku AD převodníku a výsledek výpočtů je vyslán do obvodů pro korekci úrovní a časování sériových sběrnic, které jsou přivedeny do modulu pro zobrazení dat a tato data jsou prezentována uživateli.

Blok mikroprocesoru je tvořen pouze vlastním mikroprocesorem a jeho podpůrnými obvody. Označením podpůrný obvod mikroprocesoru bývá označován například obvod hlídání úrovně napájecího napětí – resetovací obvod, obvod generování taktovacího signálu, obvody pro správné nastavení referenčních úrovní, apod.

4.3.1 Kritéria výběru obvodu mikroprocesoru

Na výkonnosti mikroprocesoru silně závisí i výkonnost celého výpočetního modulu. Bude-li mikroprocesor zpracovávat data pomalu, bude brzdit celý systém. Bude-li však použit extrémně výkonný mikroprocesor a průměrné periferní obvody, získáme pouze finančně nákladné zařízení o stejném výpočetním výkonu, jako když jsou všechny komponenty (mikroprocesor, AD převodník, obvody rozhraní) optimálně sladěny.

Mikroprocesory jsou vyráběny pro napájecí napětí 5 V, 3,3 V, 1,85 V, atd... Vzhledem k ostatním částem systému je vhodné zvolit obvod, který pracuje s napájecím napětím 3,3 V i 5 V. Toto rozhodnutí bylo provedeno na základě možné pozdější modernizace různých částí systému, které do určité míry na sobě nejsou závislé – každý blok je tvořen samostatnou deskou plošných spojů a vzájemně jsou propojeny systémovou sběrnicí. Změna bloku AD převodníku či bloku rozhraní tedy nemusí nutně způsobit změny v programu mikroprocesoru atd.

Důležitým parametrem mikroprocesorů je šířka vnitřní datové sběrnice, tedy velikost dat, se kterými je jádro mikroprocesoru (u různých variant obvodů nazýváno a řešeno různě, souhrnně však ALU – aritmeticko logická jednotka) schopno vykonávat matematické a logické operace. Jsou vyráběny mikroprocesory se šířkou datové sběrnice 8 bitů, 16 bitů, 20 bitů, 32 bitů, atd.

Pro takovýto systém je dostatečný obvod se šířkou datového slova 8 bitů. Vícebitové mikroprocesory potřebují větší dočasnou paměť pro uchovávání dat a mezivýsledků

výpočtů. S tímto problémem souvisí také velikost vnitřní paměti RAM, která by se dala jako paměť pro ukládání počátečních dat a mezivýsledků matematických operací využít nebo pro toto zálohování využít možnosti připojení externí paměti RAM k mikroprocesoru. Má-li být počet zpracovávaných 12 bitových vzorků 512 a pro ukládání mezivýsledků matematických operací je potřeba dalších 512x12 bitů, nezbude než hledat mikroprocesor s vnitřní pamětí alespoň 2048 byte nebo mikroprocesor s malou interní pamětí RAM, ale s připojenou externí pamětí RAM minimálně 2048 byte. Použití mikroprocesoru s externí pamětí RAM je pro tuto konkrétní aplikaci nevhodné, protože s každým ukládaným mezivýsledkem je nutno nastavovat řídicí signály této externí paměti, čekat na zpracování dat pamětí, atd. Pokud by byla použita sériová externí paměť RAM, byla by situace ještě komplikovanější o řízení sériové linky.

Posledním kritériem pro výběr mikroprocesoru je doba, za kterou je schopen ze vzorků signálů určit výsledek matematické operace realizované s těmito vzorky. Tato doba závisí hlavně na kmitočtu taktovacího signálu mikroprocesoru. Taktovací kmitočet se pohybuje nejčastěji v rozsahu kmitočtů od cca 8 MHz do cca 20 MHz.

Pro tuto aplikaci je optimální kmitočet taktovacího signálu mikroprocesoru okolo 12 MHz.

4.3.2 Vlastnosti vybraného mikroprocesoru

Na základě požadavků kapitoly 4.3.1 byl vybrán mikroprocesor ATmega2560 firmy Atmel. Základní parametry tohoto mikroprocesoru jsou udány *tabulkou 4.5*.

Tabulka 4.5 – Základní vlastnosti obvodu ATmega2560

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	4.5 V až 5.5 V
Max kmitočet taktovacího signálu	16 MHz
Interní paměť FLASH	256 kB
Interní paměť EEPROM	4 kB
Interní paměť RAM	8 kB
Počet vstupně/výstupních linek	86
Počet kanálů USART	4
Počet integrovaných AD převodníků	16
Počet kanálů PWM	12
Počet instrukcí	135
Počet pracovních registrů	32
Počet 8 bitových čítačů/časovačů	2
Počet 16 bitových čítačů/časovačů	4

Tento mikroprocesor má 8 bitovou datovou sběrnici, na jeho čipu je integrovaná dvou cyklová násobička. K dispozici jsou programovatelné pojistky, atd.... Vybraný mikroprocesor má řadu dalších funkcí, jejichž vyjmenování by přesáhlo rámec této práce.

Na *obrázku 4.11* se nachází schéma vybraného mikroprocesoru včetně rozložení linek. Jak je patrné z *obrázku 4.16* mikroprocesor má 11 vstupně/výstupních portů. Deset z nich je 8 bitových, jeden je 6 bitový.

IC31		
38	RESET	(AD7)PA7 71
		(AD6)PA6 72
33	XTAL2	(AD5)PA5 73
		(AD4)PA4 74
34	XTAL1	(AD3)PA3 75
		(AD2)PA2 76
98	AREF	(AD1)PA1 77
100	AUCC	(AD0)PA0 78
99	AGND	
		(OC0A/OC1C/PCINT7)PB7 26
		(OC1B/PCINT6)PB6 25
10	UCC	(OC1A/PCINT5)PB5 24
31	UCC	(OC2A/PCINT4)PB4 23
61	UCC	(MISO/PCINT3)PB3 22
80	UCC	(MOSI/PCINT2)PB2 21
11	GND	(SCK/PCINT1)PB1 20
32	GND	(SS/PCINT0)PB0 19
62	GND	
81	GND	(A15)PC7 60
		(A14)PC6 59
		(A13)PC5 58
		(A12)PC4 57
		(A11)PC3 56
		(A10)PC2 55
		(A9)PC1 54
		(A8)PC0 53
42	PL7	
41	PL6	
40	PL5(OC5C)	(T0)PD7 50
39	PL4(OC5B)	(T1)PD6 49
38	PL3(OC5A)	(XCK1)PD5 48
37	PL2(T5)	(ICP1)PD4 47
36	PL1(ICP5)	(TXD1/INT3)PD3 46
35	PL0(ICP4)	(RXD1/INT2)PD2 45
		(SDA/INT1)PD1 44
		(SCL/INT0)PD0 43
82	PK7(ADC15/PCINT23)	
83	PK6(ADC14/PCINT22)	
84	PK5(ADC13/PCINT21)	(CLK0/ICP3/INT7)PE7 9
85	PK4(ADC12/PCINT20)	(T3/INT6)PE6 8
86	PK3(ADC11/PCINT19)	(OC3C/INT5)PE5 7
87	PK2(ADC10/PCINT18)	(OC3B/INT4)PE4 6
88	PK1(ADC9/PCINT17)	(OC3A/AIN1)PE3 5
89	PK0(ADC8/PCINT16)	(XCK0/AIN0)PE2 4
		(TXD0)PE1 3
79	PJ7	(RXD0/PCIN8)PE0 2
69	PJ6(PCINT15)	
68	PJ5(PCINT14)	(ADC7/TDI)PF7 90
67	PJ4(PCINT13)	(ADC6/TDO)PF6 91
66	PJ3(PCINT12)	(ADC5/TMS)PF5 92
65	PJ2(XCK3/PCINT11)	(ADC4/TCK)PF4 93
64	PJ1(TXD3/PCINT10)	(ADC3)PF3 94
63	PJ0(RXD3/PCINT9)	(ADC2)PF2 95
		(ADC1)PF1 96
		(ADC0)PF0 97
27	PH7(T4)	
18	PH6(OC2B)	
17	PH5(OC4C)	(OC0B)PG5 1
16	PH4(OC4B)	(TOSC1)PG4 29
15	PH3(OC4A)	(TOSC2)PG3 28
14	PH2(XCK2)	(ALE)PG2 70
13	PH1(TXD2)	(RD)PG1 52
12	PH0(RXD2)	(WR)PG0 51

ATMEGA2560-16AU

Obrázek 4.11 - Schéma ATmega2560 včetně rozložení linek, převzato z [6]

Význam jednotlivých pinů mikroprocesoru ATmega2560 :

- VCC – napájecí napětí (4,5 V až 5,5 V)
- GND – zemní potenciál
- A0..A7 – port A
- B0..B7 – port B; některé jeho piny slouží pro ISP programování obvodu
- C0..C7 – port C
- D0..D7 – port D
- E0..E7 – port E
- F0..F7 – port F
- G0..G5 – port G
- H0..H7 – port H
- J0..J7 – port J
- K0..K7 – port K
- L0..L7 – port L
- RESET' - slouží pro externí resetování mikroprocesoru, pro aktivaci resetu musíme přivést úroveň L po minimální dobu trvání tohoto signálu
- XTAL1 – slouží pro připojení externího zdroje taktovacího signálu (krystalový oscilátor)
- XTAL2 – slouží pro připojení externího zdroje taktovacího signálu (krystalový oscilátor)
- AVCC – slouží pro napájení pinů portu F, jejichž alternativní funkcí je AD převod
- AREF – referenční úroveň pro AD převodníky

4.3.3 Volba zapojení bloku mikroprocesoru s obvodem ATmega2560

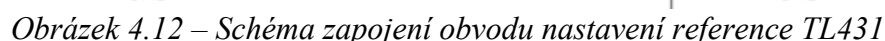
Kompletní schéma zapojení se opět nachází v *příloze 1*, osazovací plán a předlohy pro výrobu desek plošných spojů se nacházejí v *příloze 2*.

Schéma zapojení bloku mikroprocesoru obsahuje pouze zapojení mikroprocesoru ATmega2560, jeho podpůrných obvodů, kontrolních LED, port ISP, filtračních kondenzátorů a konektorů systémové sběrnice.

Na této desce plošných spojů je umístěn indikátor přivedeného napájecího napětí – LED v sérii s ochranným rezistorem 270 Ω . Tato kombinace je zapojena mezi napájecí napětí (5 V) a zemní potenciál.

Signalizační LED jsou přes ochranné rezistory 600 Ω připojeny k portu K mikroprocesoru. Aktivní jsou ty LED, jejichž pin portu K je nastaven do logické úrovně L.

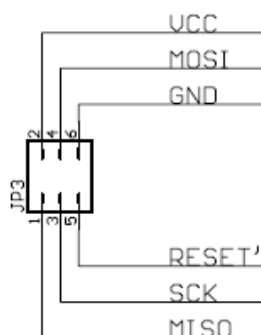
Jedním z podpůrných obvodů mikroprocesoru je obvod TL431 sloužící pro nastavení referenční úrovně pro AD převodníky integrované do portu F mikroprocesoru. Tento obvod vytváří referenční napětí 2,5 V. Schéma zapojení tohoto obvodu je patrné z *obrázku 4.12*.



Obrázek 4.13 – Schéma zapojení obvodu pro generování RESET' signálu TL7705

- MISO – master in slave out = data od master zařízení k slave zařízení
- MOSI – master out slave in = data od slave zařízení k master zařízení
- SCK – serial clock = synchronizační taktovací signál
- RESET' - reset = resetovací signál obvodu

Schéma zapojení konektoru ISP při pohledu shora je na *obrázku 4.14*.



Obrázek 4.14 – Pohled shora na zapojení konektoru ISP

Obvod ATmega2560 sice disponuje interním oscilátorem, ale pro tuto aplikaci je použit externí zdroj taktovacího signálu tvořeného krystalovým oscilátorem a dvěma kondenzátory o velmi malých kapacitách zapojenými proti zemi. Externím oscilátorem lze dosáhnout vyššího taktovacího kmitočtu než interním oscilátorem.

5. Návrh dalších částí systému radaru

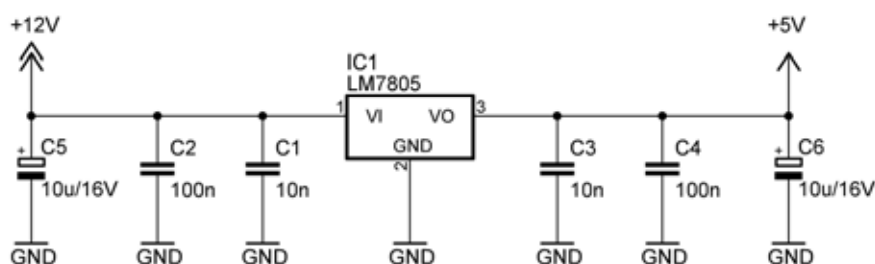
Tato kapitola prezentuje návrh částí systému, které přímo nespádají do výpočetní části, ale jsou s ní propojeny. Jedná se především o obvody úpravy signálu a obvody stabilizace napájecího napětí.

5.1 Návrh obvodů stabilizace napětí

Tato kapitola prezentuje návrh částí systému, které přímo nespádají do výpočetní části, ale jsou s ní propojeny. Jedná se především o obvody úpravy signálu a obvody stabilizace napájecího napětí.

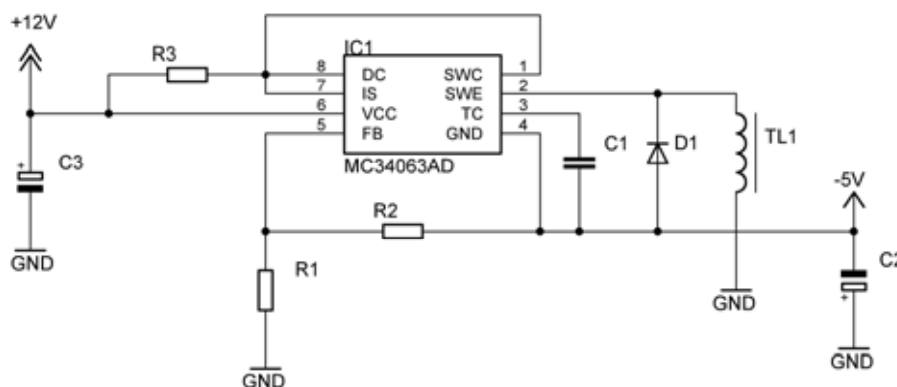
Celé zařízení je napájeno z 12 V baterie. Vlivem vybití baterie dochází k poklesu jejího svorkového napětí. Pro použité číslicové obvody je zapotřebí stabilizovaného napětí 5 V proti zemi. Napájení operačních zesilovačů použitých v obvodech úpravy vstupního signálu (kapitola 5.2) však vyžaduje symetrické napětí ± 5 V.

Vstupem stabilizátorů napětí je tedy napětí 12 V, a výstupem jsou napětí +5 V a -5 V. Pro stabilizaci napětí +5 V jsem použil integrovaný stabilizátor LM7805 v klasickém provedení (pouzdro TO220 a maximální odběr zátěže 1 A), zapojení je znázorněno na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1 – Schéma zapojení LM7805

Pro stabilizaci napětí -5 V je použit měnič MC34063 v zapojení pro invertování vstupního napětí. Schéma zapojení je znázorněno na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2 – Schéma zapojení MC34063

Pomocí vzorců v katalogovém listu měniče MC34063 byly dopočteny hodnoty jednotlivých pasivních součástek použitých pro nastavení adekvátních vstupních a

výstupních proudů a napětí. Postup výpočtu hodnot jednotlivých součástek je následující.

Stanovení veličin nezbytných pro výpočty :

- vstupní napětí : $V_{IN} = 12 \text{ V}$
- požadované výstupní napětí : $V_{OUT} = -5 \text{ V}$
- maximální odebíraný proud zátěží : $I_{OUT(max)} = 300 \text{ mA}$
- zvlnění výstupního napětí (před přídavným vyhlazovacím LC článkem) :
 $V_{RIPPLE(p-p)} = 10 \text{ mV}$
- saturační napětí na výstupním spínacím tranzistoru : $V_{SAT} = 1 \text{ V}$
- kmitočet spínání : $f = 33 \text{ kHz}$
- napětí na diodě v propustném směru : $V_F = 0,7 \text{ V}$

Výpočet poměru doby sepnutí k době rozepnutí výstupního spínacího tranzistoru :

$$\frac{t_{ON}}{t_{OFF}} = \frac{|V_{OUT}| + V_F}{V_{IN} - V_{SAT}} = \frac{|-5| + 0.7}{12 - 1} = 0.52$$

Výpočet periody spínání, tedy součtu doby kdy je spínač sepnut a rozepnut :

$$T = (t_{ON} + t_{OFF}) = \frac{1}{f} = \left\{ \frac{1}{33 \cdot 10^3} \right\} = 30.3 \mu s$$

Z prvního výpočtu plyne, že $t_{ON} = 0,455 \cdot t_{OFF}$, a tedy :

$$t_{ON} + t_{OFF} = 30.3 \mu s$$

$$0.52 \cdot t_{OFF} + t_{OFF} = 30.3 \mu s$$

$$1.52 \cdot t_{OFF} = 30.3 \mu s$$

$$t_{OFF} = 20 \mu s$$

$$t_{ON} = (t_{ON} + t_{OFF}) - t_{OFF} = \{30.3 - 20\} = 10.3 \mu s$$

Výpočet kapacity kondenzátoru C_1 :

$$C_1 = 4 \cdot 10^{-5} \cdot t_{ON} = \{4 \cdot 10^{-5} \cdot 10.3 \cdot 10^{-6}\} = 412 \text{ pF} , \text{ tedy z řady E24 byla vybrána hodnota } 430 \text{ pF}$$

Výpočet maximálního proudu spínačem :

$$I_{PK(SWITCH)} = 2 \cdot I_{OUT(max)} \cdot \left(\frac{t_{ON}}{t_{OFF}} + 1 \right) = \{2 \cdot 0.3 \cdot (0.52 + 1)\} = 0.91 \text{ A}$$

Výpočet hodnoty rezistoru R_3 :

$$R_3 = \frac{0.3}{I_{PK(SWITCH)}} = \left\{ \frac{0.3}{0.91} \right\} = 0.33 \Omega$$

Výpočet minimální indukčnosti tlumivky TL1 :

$$L_{\min} = \frac{V_{IN(\min)} - V_{SAT}}{I_{PK(SWITCH)}} \cdot t_{ON} = \left\{ \frac{10-1}{0.91} \cdot 10.3 \cdot 10^{-6} \right\} = 102 \mu H , \text{ byla zvolena tlumivka o}$$

indukčnosti 100 μH

Výpočet kapacity filtračního kondenzátoru C_2 :

$$C_2 = 9 \cdot \frac{I_{OUT(\max)} \cdot t_{ON}}{V_{RIPPLE(p-p)}} = \left\{ 9 \cdot \frac{0.3 \cdot 10.3 \cdot 10^{-6}}{0.01} \right\} = 2.8 mF , \text{ tedy z řady E24 byla zvolena}$$

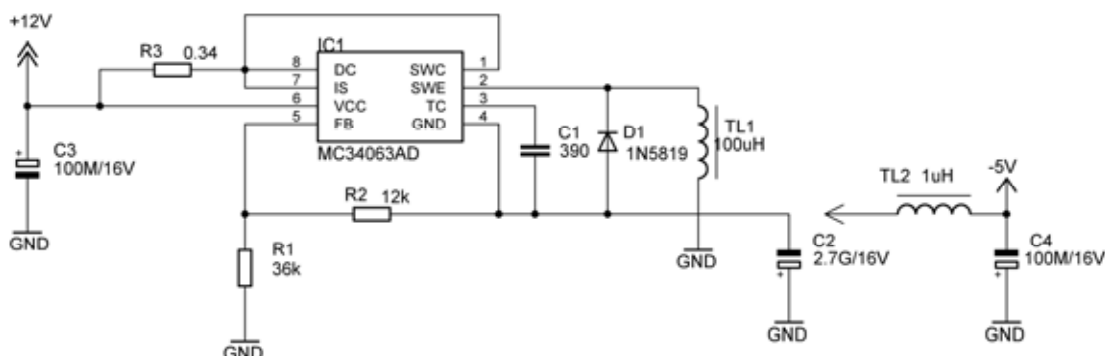
velikost kapacity kondenzátoru 3,0 mF/16 V

Určení hodnot rezistorů R_1 a R_2 . Hodnota rezistoru R_2 byla zvolena 12 k Ω a hodnota rezistoru R_1 se vypočte :

$$R_1 = \left(\frac{|U_{OUT}|}{1.25} - 1 \right) \cdot R_2 = \left\{ \left(\frac{|-5|}{1.25} - 1 \right) \cdot 120000 \right\} = 36 k\Omega , \text{ tyto hodnoty spadají přímo do}$$

řady E24

Schéma zapojení invertujícího měniče s doplněním parametrů součástek a doplněný o výstupní vyhlazovací LC článek je znázorněno na *obrázku 5.3*. Kondenzátor C_3 slouží pro filtraci vstupního napětí a jeho kapacita je zvolena 100 μF /16 V.



Obrázek 5.3 – Schéma zapojení měniče MC34063 s doplněním parametrů součástek

5.2 Návrh obvodů úpravy vstupního signálu

Zde je proveden výběr senzoru, návrh obvodů pro úpravu vstupního signálu z vysokofrekvenčního čidla. Úroveň tohoto signálu je velmi nízká (řádově 10 mV) a spektrum složek tohoto signálu je zbytečně rozsáhlé. Je tedy potřeba navrhnout filtr vyššího řádu pro odstranění nepotřebných frekvenčních složek a automaticky řízený zesilovač pro udržování konstantního rozkmitu záznamového signálu.

5.2.1 Mikrovlnný pohybový senzor

Byl vybrán senzor KMY24. Tento senzor vysílá záření na kmitočtu 2,45 GHz. Po příjmu odraženého signálu je tento přijatý signál směřován ve dvou směšovačích s původním vysílaným signálem. Signály obou směšovačů jsou vyvedeny. Fázový rozdíl mezi těmito dvěma signály určuje směr pohybu cíle vůči senzoru. Pokud se cíl přibližuje k senzoru, roste amplituda napětí na výstupu směšovačů a fázový posuv

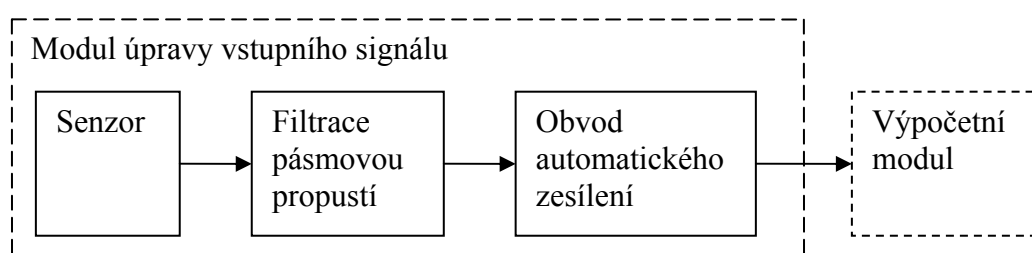
signálu na výstupu směřovače 1 je vůči signálu na výstupu směřovače 2 kladný, při vzdalování je tento fázový posun záporný.

Napájecí napětí zvoleného senzoru je 12 V a proudový odběr činí 23 mA. Vyzářený výkon ekvivalentní izotropnímu zářiči je 8 dBm.

5.2.2 Návrh obvodu pro filtraci záznějového signálu

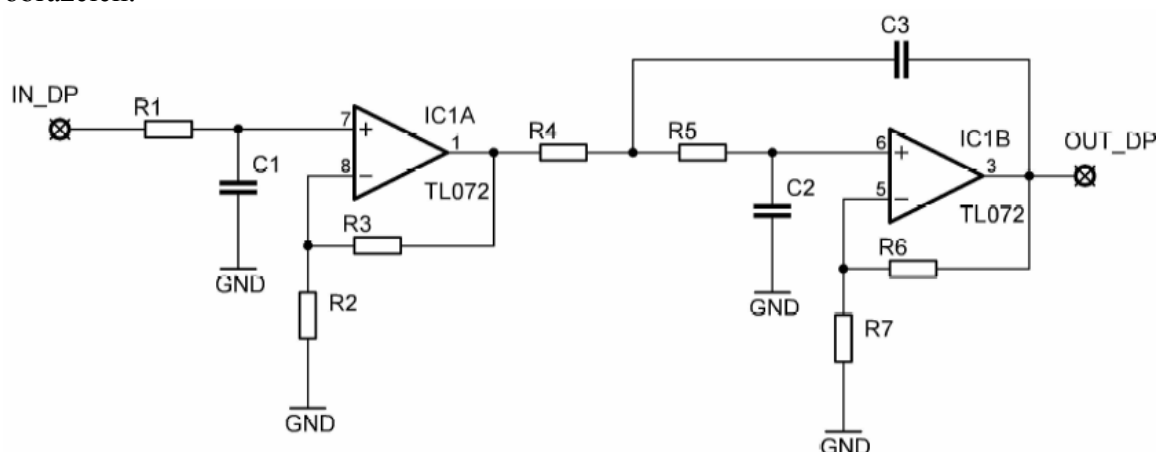
Před přivedením záznějového signálu k AD převodníku je vhodné záznějový signál filtrovat. Nemá smysl převádět do digitální formy kmitočty nižší než 80 Hz a vyšší než 1800 Hz, neboť kmitočtům záznějového signálu menších než 80 Hz odpovídá rychlost pohybu objektu do 5 km/hod a kmitočtům vyšším než 1800 Hz odpovídá rychlost vyšší než 104 km/hod. Displej je dvoumístný takže již tato čísla nelze zobrazit.

Obrázek 5.4 znázorňuje způsob propojení jednotlivých bloků modulu pro zpracování vstupního záznějového signálu.

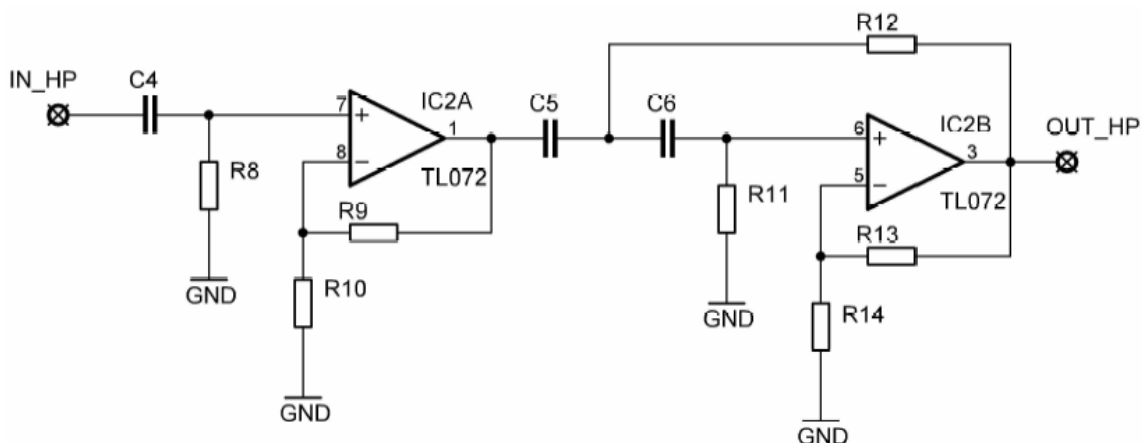


Obrázek 5.4 – Blokové schéma obvodů úpravy vstupního signálu

Pro filtrování záznějového signálu je tedy potřeba sestavit pásmovou propust. Zvolili jsme aktivní pásmovou propust s Čebyševovou aproximací třetího řádu s maximálním požadovaným zvlněním $\alpha = 1$ dB. Tato pásmová propust je sestavena ze dvou dílčích filtrů třetího řádu, první z nich je dolní propust s mezním kmitočtem 1800 Hz a druhý je horní propust s mezním kmitočtem 80 Hz. Schéma zapojení se nachází na následujících obrázcích.



Obrázek 5.5 – Schéma zapojení dolní propusti třetího řádu



Obrázek 5.6 - Schéma zapojení horní propusti třetího řádu

Pomocí literatury [11] jsem pro hodnotu zvlnění $\alpha = 1$ dB odečetl koeficienty pro výpočet hodnot pasivních součástek filtrů.

$$b_0 = 0,494171$$

$$a_1 = 0,494171$$

$$b_1 = 0,994205$$

Výpočet hodnot pasivních součástek dolní propusti :

Přenos operačního zesilovače IC1A jsem zvolil $G_{IC1A} = 4$ a přenos IC1B $G_{IC1B} = 1$. Napájení operačních zesilovačů je ze symetrického stejnosměrného zdroje ± 5 V. Pro zjednodušení se volí hodnota všech rezistorů v zapojení shodná, zvolil jsem $R_1 = R_2 = R_4 = R_5 = R_7 = R = 10$ k Ω . Mezní kmitočet $f_0 = 1800$ Hz.

$$G_{IC1A} = 1 + \frac{R_3}{R_2} \Rightarrow R_3 = (G_{IC1A} - 1) \cdot R_2 = \{(4 - 1) \cdot 10000\} = 30 \text{ k}\Omega \quad , \text{ což je přímo hodnota z řady E24}$$

$$G_{IC1B} = 1 + \frac{R_6}{R_7} \Rightarrow R_6 = (G_{IC1B} - 1) \cdot R_7 = \{(1 - 1) \cdot 10000\} = 0 \Omega \quad , \text{ } R_6 \text{ bude nahrazen skratem}$$

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot b_0 \cdot R} = \left\{ \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1800 \cdot 0,494171 \cdot 10000} \right\} = 17,9 \text{ nF} \quad , \text{ tedy jsem zvolil kondenzátor o kapacitě } 18 \text{ nF (řada E12)}$$

$$C_2 = \frac{a_1}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot b_1 \cdot R} = \left\{ \frac{0,494171}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1800 \cdot 0,994205 \cdot 10000} \right\} = 2,2 \text{ nF} \quad , \text{ což je přímo hodnota z řady E12}$$

$$C_3 = \frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot a_1 \cdot R} = \left\{ \frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 1800 \cdot 0,494171 \cdot 10000} \right\} = 35,8 \text{ nF} \quad , \text{ tedy jsem zvolil paralelní kombinaci kondenzátorů o kapacitách } 33 \text{ nF a } 2,7 \text{ nF}$$

Výpočet hodnot pasivních součástek dolní propusti :

Přenos operačního zesilovače IC2A jsem zvolil $G_{IC2A} = 2$ a přenos IC2B $G_{IC2B} = 1$. Napájení operačních zesilovačů je ze symetrického stejnosměrného zdroje ± 5 V. Pro zjednodušení se volí hodnota všech kondenzátorů v zapojení shodná, zvolil jsem $C_4 = C_5 = C_6 = C = 68$ nF. Mezní kmitočet $f_0 = 80$ Hz.

$$R_8 = \frac{b_0}{C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0} = \left\{ \frac{0.494171}{68 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 80} \right\} = 14.5 \text{ kHz} , \text{ tedy jsem z řady E12 vybral hodnotu } 15 \text{ k}\Omega$$

$$R_{10} \doteq R_8 = 15 \text{ k}\Omega$$

$$G_{IC2A} = 1 + \frac{R_9}{R_{10}} \Rightarrow R_9 = (G_{IC2A} - 1) \cdot R_{10} = \{(2 - 1) \cdot 15000\} = 15 \text{ k}\Omega$$

$$R_{11} = \frac{2 \cdot \frac{b_1}{a_1}}{C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0} = \left\{ \frac{2 \cdot \frac{0.994205}{0.494171}}{68 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 80} \right\} = 118 \text{ k}\Omega , \text{ tedy jsem z řady E12 vybral hodnotu } 120 \text{ k}\Omega$$

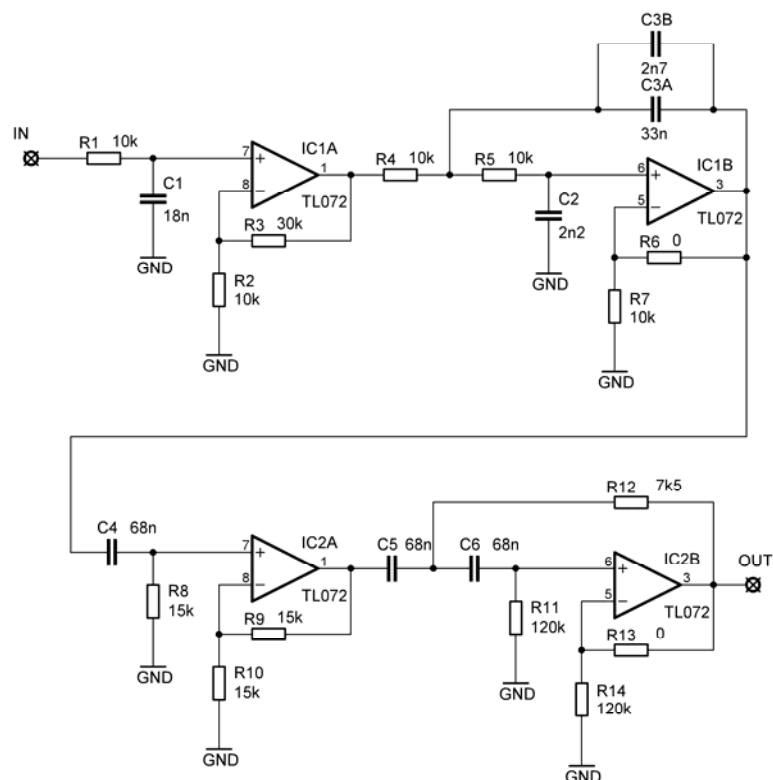
$$R_{12} = \frac{a_1}{C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0} = \left\{ \frac{0.494171}{68 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 80} \right\} = 7.23 \text{ k}\Omega , \text{ tedy jsem z řady E24 vybral hodnotu } 7,5 \text{ k}\Omega$$

$$R_{14} \doteq R_{12} = 120 \text{ k}\Omega$$

$$G_{IC2B} = 1 + \frac{R_{13}}{R_{14}} \Rightarrow R_{13} = (G_{IC2B} - 1) \cdot R_{14} = \{(1 - 1) \cdot 15000\} = 0 \Omega$$

Byly vybrány operační zesilovače TL072. Jedná se o nízkošumový operační zesilovač s velmi nízkým harmonickým zkreslením (typicky 0,003 %), velkou šířkou pásma (B1 je 3 MHz) a velkou citlivostí. Tyto operační zesilovače jsou integrovány dva v jednom pouzdře.

Následující obrázek ukazuje způsob propojení obou dílčích filtrů třetího řádu s doplněním konkrétních hodnot pasivních součástek.

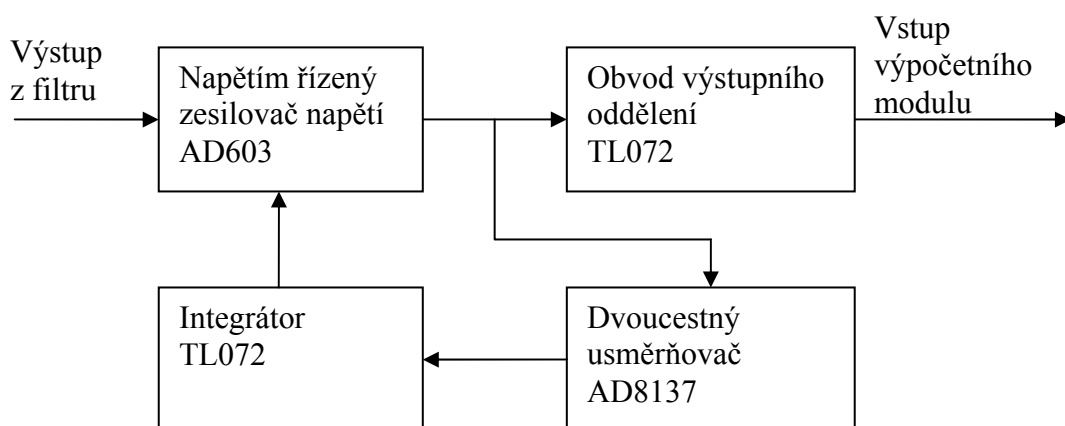


Obrázek 5.7 - Propojení dolní a horní propusti s uvedením konkrétních hodnot pasivních součástek

5.2.3 Návrh obvodu pro samočinné řízení zesílení vstupního signálu

Aktivní filtr navržený v předchozí podkapitole sice zesiluje 8 krát, ale vzhledem k nízké úrovni vstupního signálu je potřeba jej ještě více zesílit a pokud je to možné nejlépe na úroveň vhodnou pro optimální využití AD převodníku.

Blokové schéma obvodu pro samočinné řízení zesílení vstupního signálu je znázorněno na obrázku 5.8.



Obrázek 5.8 – Blokové schéma obvodu automatického řízení zesílení

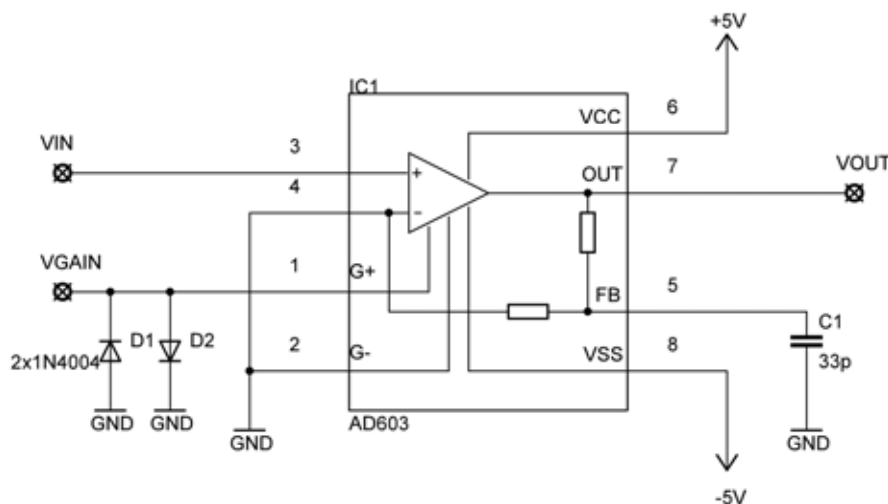
Pro tento obvod “automatického“ zesílení byly vybrány obvody AD603, AD8137 a TL072.

Napětím řízený zesilovač napětí AD603

Jedná se o napětím řízený obvod zesilovače napětí. Je použit v zapojení, kde je prostřednictvím stejnosměrného napětí získaného zpětnou vazbou řízeno zesílení záznejového signálu z výstupu vstupního filtru (pásmové propusti). Tento obvod je napájen symetrickým napětím ± 5 V. Obvod je použit v zapojení, které dovoluje regulaci zesílení v rozsahu 10 dB až 50 dB a šířka kmitočtového pásma je 9 MHz. Rozsah vstupního napětí obvodu je $\pm 1,4$ V a rozsah řídicího napětí je od -0,5 V do 0,5 V. Zesílení obvodu se určí dle vztahu :

$$\text{Gain}(dB) = 40 \cdot V_G + 30$$

, kde Gain je zesílení vstupního signálu v dB a V_G je řídicí napětí ve voltech. Na obrázku 5.9 je znázorněno použité zapojení řízeného zesilovače AD603.



Obrázek 5.9 – Použité zapojení řízeného zesilovače AD603

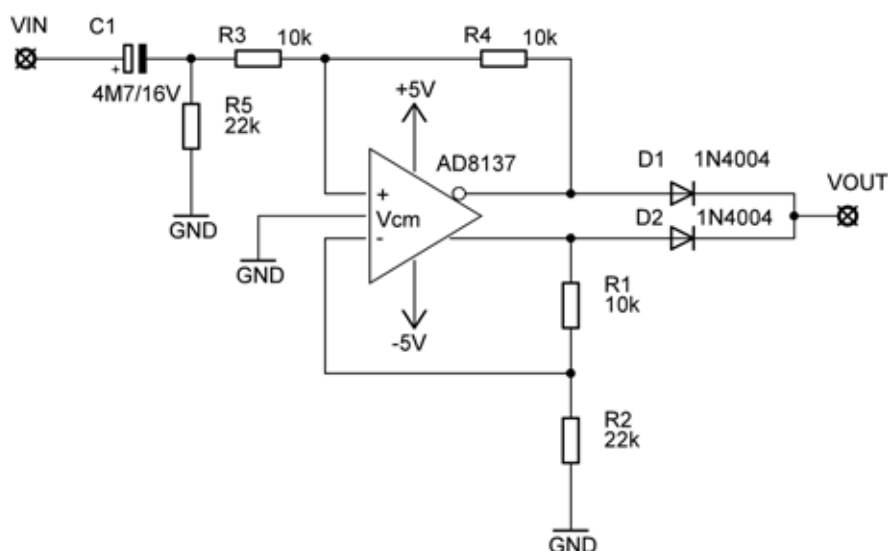
Diody na vstupu G_1 jsou zapojeny z důvodu ochrany před překročením mezních hodnot rozsahu napětí tohoto vstupu. Filtrační kondenzátory napájecího napětí nejsou v obrázku uvedeny.

Rozdílový zesilovač AD8137

Signál z výstupu řízeného zesilovače se větví do dvou směrů, první z nich je oddělovací zesilovač, z jehož výstupu je signál přiváděn na vstup AD převodníku a druhý směr je zpětnovazební smyčka. V této zpětné vazbě je zapojen dvoucestný usměrňovač s operačním zesilovačem DIDO (Double Input Double Output – má dva inverzní vstupy a dva inverzní výstupy) AD8137, za nímž je ještě zapojen integrátor. Integrátor mění usměrněné napětí na plynule se měnící regulační napětí obvodu řízeného zesilovače AD603.

Napětí z výstupu řízeného zesilovače přivedeno přes oddělovací kondenzátor 4,7 μ F/16 V, doplněného rezistorem zapojeným vůči zemi (slouží ke snížení časové konstanty samotného kondenzátoru a zároveň se jeví jako vnitřní odpor zdroje signálu

pro diferenciální operační zesilovač). Vstup nastavující stejnosměrný posun (V_{CM}) je připojen přímo na zem, tedy napětí na pozitivním i negativním výstupu mají v absolutní hodnotě stejnou velikost amplitudy. Obvod AD8137 je napájen napětím ± 5 V a vstupní napětí musí odpovídat limitu ± 2 V. Obvod má velmi velkou šířku pásma B3 (min 64 MHz). Vlivem úbytku napětí na výstupu zesilovače a vlivem úbytku napětí na usměrňovacích diodách je V_{OUT} v rozsahu 0 V až 0,5 V.



Obrázek 5.10 – Usměrňovač s operačním zesilovačem AD8137

Jedná se přímo o katalogové zapojení obvodu. Rezistory R_1 , R_3 a R_4 se volí tak, aby jejich hodnota byla shodná. Byla zvolena hodnota 10 k Ω . Hodnota rezistoru R_2 je volena jako součet poloviny hodnoty rezistoru R_5 sečtená s hodnotou R_3 . R_5 byl zvolen 22 k Ω a $R_1 = R_3 = R_4$ byly zvoleny 10 k Ω , tudíž R_2 je :

$$R_2 = \frac{R_5}{2} + R_1 = \left\{ \frac{22000}{2} + 10000 \right\} = 21 \text{ k}\Omega, \text{ což znamená výběr hodnoty } 22 \text{ k}\Omega \text{ z řady}$$

E12

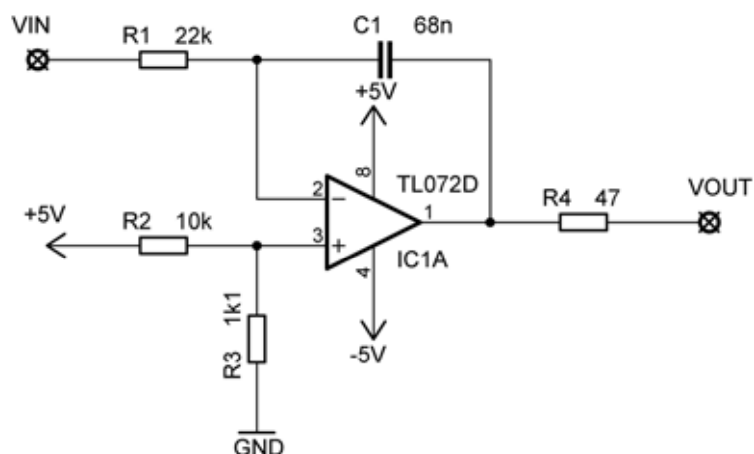
Integrátor v zapojení slouží pro převod usměrněného avšak stále velmi proměnného napětí za dvoucestným usměrňovačem na napětí stejnosměrné a pomalu se měnící. Rezistor R_4 slouží jako impedanční přizpůsobení výstupu integrátoru k řídicímu vstupu AD603. Z výstupu usměrňovače přichází napětí s maximální hodnotou přibližně 0,5 V. Rezistor R_1 (22 k Ω) společně s kondenzátorem C_1 (100 nF) tvoří integrační článek o časové konstantě :

$$\tau = R_1 \cdot C_1 = \{22 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9}\} = 2,2 \text{ ms}$$

Rezistory R_3 a R_4 tvoří napěťový dělič, prostřednictvím kterého je k neinvertujícímu vstupu operačního zesilovače přivedeno napětí o velikosti :

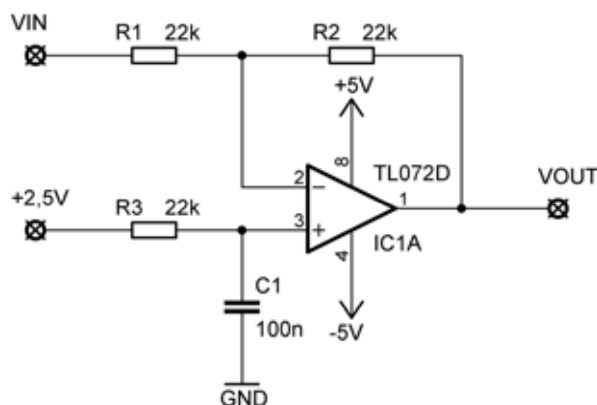
$$U_{\text{neinvert}} = \frac{U_{CC} \cdot R_3}{R_3 + R_4} = \left\{ \frac{5 \cdot 1100}{1100 + 10000} \right\} = 0.495 \text{ mV}$$

Toto napětí slouží k nastavení rozhodovací úrovně integrátoru. Schéma zapojení integrátoru včetně hodnot součástek je znázorněno na obrázku 5.11.



Obrázek 5.11 – Integrátor s operačním zesilovačem TL072

Poslední z obvodů zesilovače je obvod výstupního oddělení. Tento obvod je znázorněn na obrázku 5.13. Jedná se o operační zesilovač v invertujícím zapojení, na jehož neinvertující vstup je přivedeno napětí 2,5 V, sloužící ke stejnosměrnému posunu vstupního napětí. Hodnoty rezistorů R_1 a R_2 jsou shodné, proto je napěťový přenos roven -1 a celkové výstupní napětí je rovno : $U_{OUT} = 2,5 \text{ V} - U_{IN}$. V_{IN} je výstupní napětí z AD603 a jeho rozkmit je $\pm 2 \text{ V}$, na výstupu oddělovače je tedy napětí z rozsahu 0,5 V až 4,5 V, což je optimální pro využití rozsahu AD převodníku ve výpočetním modulu. Filtrační kondenzátory napájecího napětí nejsou v obrázku uvedeny.

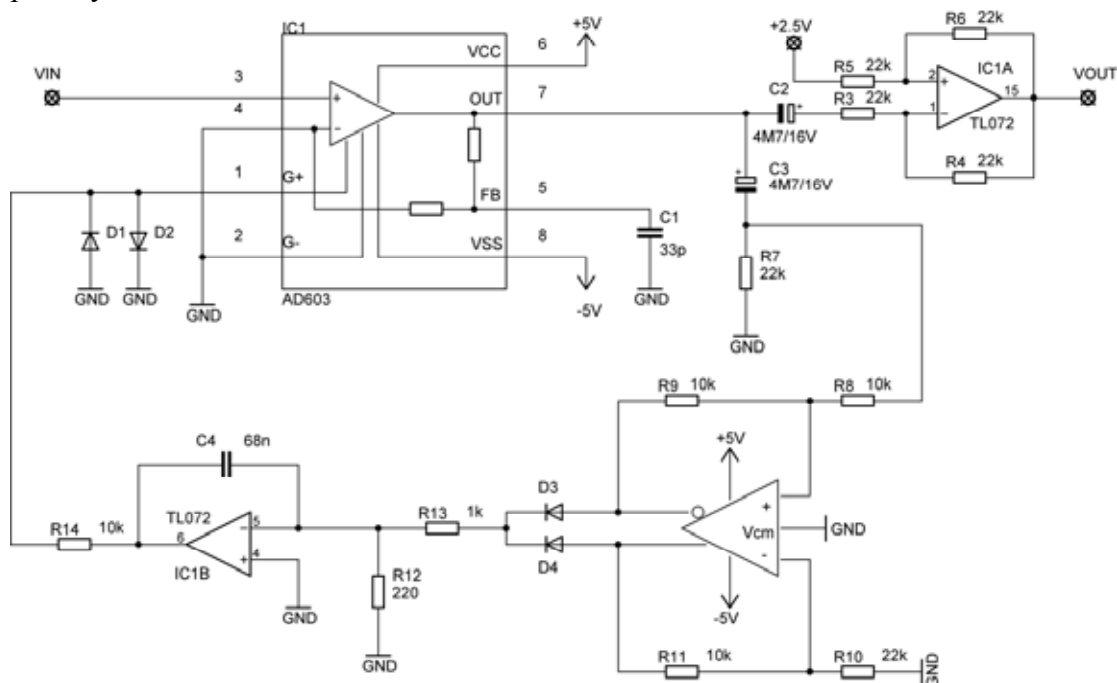


Obrázek 5.12 – Výstupní oddělovač s operačním zesilovačem TL072

U všech obvodů je provedeno blokování napájecího napětí kondenzátory o kapacitě 100 nF proti zemi, případně ještě tantalovými kondenzátory o kapacitě 10 μF /16 V.

Na vstup řízeného zesilovače přichází záznejový signál úrovně maximálně 300 mV, zde je zesílen na úroveň cca $\pm 2,2 \text{ V}$. Toto napětí je ve výstupním oddělovacím členu s operačním zesilovačem TL072 odečteno od referenční hodnoty napětí přivedené na neinvertující vstup a na výstupu oddělovače (vstup AD převodníku) je napětí úrovně 0,3 V až 4,7 V. Napětí $\pm 2,2 \text{ V}$ je ve zpětnovazební větvi usměrněno a prostřednictvím integrátoru převedeno na stejnosměrnou úroveň.

Obrázek 5.13 znázorňuje propojení obvodů zesilovače vstupního signálu popsaných v kapitole 5.2.3. Vstupní signál pro obvody zesilovače přichází z výstupu pásmové propusti popsané a navržené v kapitole 5.2.2. Výstupní signál za oddělovačem s operačním zesilovačem přichází na vstup AD převodníku k převedení do digitální podoby.



Obrázek 5.13 – Kompletní schéma zapojení zesilovacích obvodů

Ve schématu na obrázku 5.13 není uvedeno označení diod, je potřeba vybrat dostupné a dostatečně kvalitní diody. Kompletní schéma zapojení obvodu modulu pro vstupní úpravu signálu a kusovník tohoto modulu se nacházejí v příloze 4.

6. Realizace systému

V této kapitole je pojednáno o propojení jednotlivých bloků výpočetního modulu a o jeho celkové realizaci.

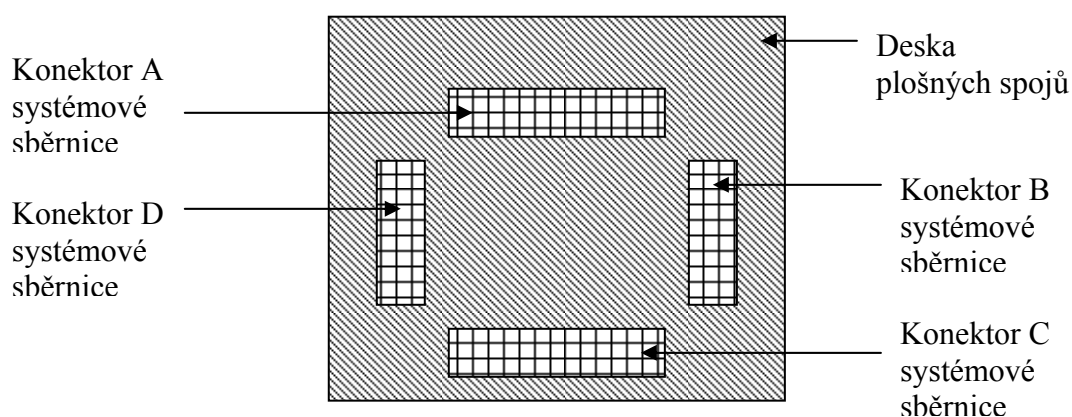
Každý blok navrhovaného výpočetního modulu je navržen jako samostatná jednotka, která je propojena se zbylými částmi pouze prostřednictvím systémové sběrnice. Jednotlivé bloky jsou tedy i realizovány jako samostatné desky plošných spojů. Tyto jednotlivé bloky lze využít i samostatně, pokud je cíleně nechceme využít v modulu, pro který jsou navrženy, můžeme všechny tři bloky bez problémů využívat naprosto samostatně.

Jestliže chceme využít blok AD převodu zcela samostatně, máme k dispozici plošný spoj osazený 12 bitovým AD převodníkem, jehož vstupní a výstupní signály jsou vyvedeny na konektory (jsou rovněž součástí bloku). Stejně podmínky platí pro samostatné využití bloku mikroprocesoru – je tedy k dispozici plošný spoj, na kterém je osazen mikroprocesor s 86 vstupně/výstupními piny a doplněn podpůrnými obvody pro správnou činnost – máme tedy k dispozici vývojovou desku pro ladění aplikací a programů (samozřejmě pouze pro tento typ mikroprocesoru). Blok rozhraní lze také využít samostatně jako převodník mezi úrovněmi TTL a RS232.

Pro výpočetní modul Dopplerovského radaru je však potřeba využít všech tří navržených bloků v součinnosti. Desky plošných spojů jednotlivých bloků se do sebe zasouvají pomocí konektorů již mnohokrát zmíněné systémové sběrnice (detailní popis této sběrnice se nachází v *příloze 3*). Touto sběrnicí jsou přenášena veškerá data uvnitř výpočetního modulu – datové i řídicí signály rovněž slouží k rozvedení napájecího napětí do desek plošných spojů všech bloků.

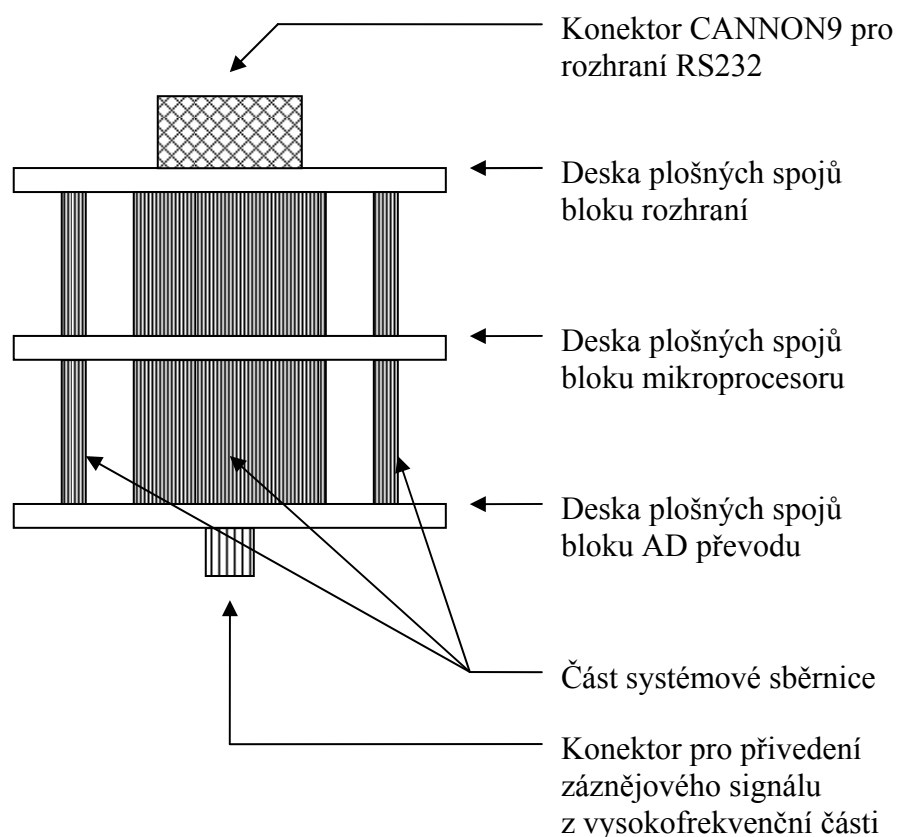
Systémová sběrnice prochází napříč celým systémem a tedy dovolí případné připojení dalšího bloku k systému navrženému v této práci.

Na *obrázku 6.1* je pohled shora na propojený systém, je zde zakreslena realizace systémové sběrnice prostupující celým systémem.



Obrázek 6.1 – rozvržení konektorů systémové sběrnice při pohledu shora na DPS

Obrázek 6.2 znázorňuje způsob propojení desek plošných spojů jednotlivých bloků navrženého modulu (boční pohled na propojený systém). Na tomto obrázku jsou znázorněny nejdůležitější konektory systému.



Obrázek 6.2 – Boční pohled na propojení jednotlivých bloků výpočetního modulu

Blok rozhraní a blok AD převodníku jsou navrženy jako jednostranné plošné spoje s několika drátovými propojkami v druhé vrstvě neboli jako dvouvrstvé desky s minimem cest v jedné z vrstev. Blok mikroprocesoru je navržen jako dvouvrstvá deska plošných spojů. Bylo nutno jednotlivé desky plošných spojů navrhnout s co nejmenšími rozměry, díky oboustranným deskám plošných spojů jsou rozměry stran desek 54 mm a 58 mm. Výška systému všech tří DPS závisí na použitých konektorech pro systémovou sběrnici, předpokladem však je celková výška tohoto “sloupce” nepřesáhne 50 mm.

Bližší informace o deskách plošných spojů, jejich osazovacích plánech a předlohách pro výrobu lze nalézt v *příloze 2*.

7. Popis programu mikroprocesoru ATmega2560

7.1 Teoretický popis programu

Cílem programu vykonávaného mikroprocesorem ATmega2560 souhrn úkonů potřebný k výpočtu rychlosti vozidla ze vzorků záznejového signálu. V této kapitole není kreslen klasický vývojový diagram, je zde popsán sled činností mikroprocesoru v chronologickém pořadí.

- 1) Po zapnutí napájecího napětí se provede počáteční inicializace ATmega2560, jsou nastaveny parametry čítačů/časovačů, zdroje a priority přerušení, parametry sériových kanálů 0 a 3 (jsou využity k přenosu dat linkou RS232),
- 2) V tomto bodě následuje příprava konstant pro výpočty. Vzhledem k nutnosti výpočtu FFT (Fast Fourier Transformation) je potřeba předem zavést pole pro ukládání dílčích výpočtů a před použitím je vynulovat.

Následující body předpokládají zapnutou vysokofrekvenční část z níž se na vstup AD převodníku dostává analogový záznejový signál.

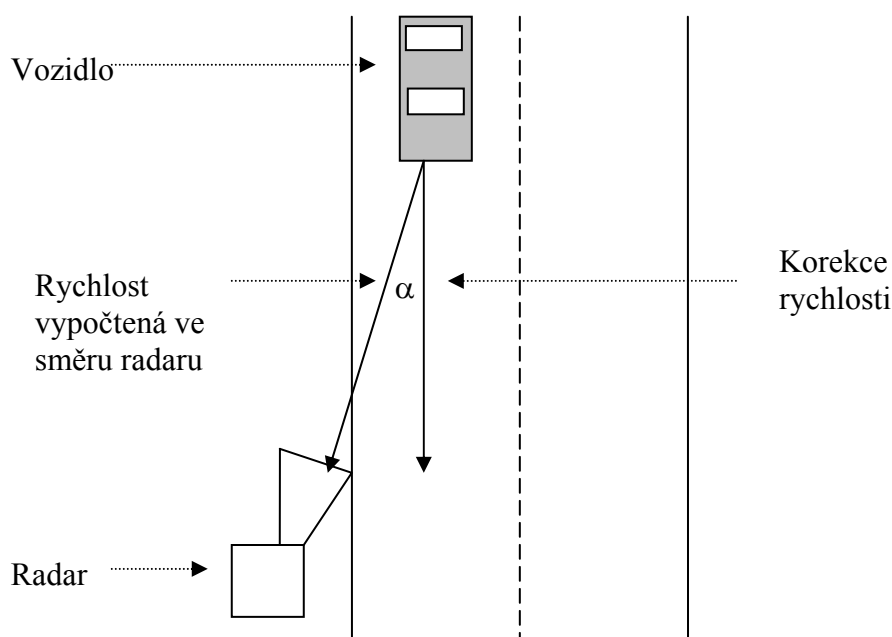
- 3) Zde probíhá komunikace s AD převodníkem AD7492 typu master (ATmega2560) a slave (AD7492AR). Mikroprocesor tedy řídí, ovládá AD převodník a získaná data zapisuje opět do své interní paměti RAM (do připraveného pole). Celkem 512 krát proběhne žádost o převod záznejového signálu, žádost o vystavení platných dat převodu na společnou datovou sběrnici a uložení 12 bitů výsledku převodu do interní paměti (do pole hodnot).
- 4) V tomto bodě probíhá nejnáročnější výpočet. Zde se provádí FFT (rychlá Fourierova transformace). Protože záznejový signál na vstupu bloku AD převodu je silně zarušen šumem, je potřeba jej převést do oblasti spektra tohoto vstupního signálu. Pro tento převod slouží právě rychlá Fourierova transformace. Díky této transformaci lze z 512 vzorků získaných v časové oblasti (postupným převáděním analogových hodnot) a uložených v interní paměti RAM získat spektrum tohoto vstupního signálu o počtu 512 spektrálních čar. Po provedení transformace získáme 512 hodnot, které odpovídají velikostem (výškám) jednotlivých spektrálních čar. Tyto hodnoty jsou rovněž uloženy do interní paměti RAM (mohou přepsat hodnoty vzorků původních signálů). Vzdálenost spektrálních čar je rovna vzorkovacímu kmitočtu vydělenému počtem vzorků snížených o 1. Tuto rychlou Fourierovu transformaci lze realizovat například metodou tzv. "motýlků".
- 5) Dále je potřeba nalézt spektrální složku s maximální velikostí modulu a její index (pořadí) násobit frekvenční vzdáleností dvou spektrálních čar. Tímto se určí velikost záznejového kmitočtu Δf .
- 6) Byl vyjádřen vztah pro výpočet rychlosti ze známého kmitočtu mikrovlnného signálu emitovaného vysílačem, rychlosti světla a záznejového kmitočtu :

$$v_{VOZIDLA} = \frac{\Delta f \cdot c}{2 \cdot f_V} \quad (7.1)$$

význam jednotlivých písmen ve vzorci je následující :

- Δf – záznejový kmitočet
- c – rychlost světla
- f_V – kmitočet vysílaného mikrovlnného záření
- $v_{VOZIDLA}$ – rychlost pohybujícího se objektu

- 7) Dále je potřeba provést korekci vypočtené rychlosti vozidla, protože rychlost vozidla určená v bodě 6) odpovídá rychlosti vozidla, ale ve směru k radaru, ne však ve směru osy vozovky. Situace je znázorněna na *obrázku 7.1*. Úhel α bývá většinou do 10° . Pro velmi malé úhly je možno korekci zanedbat.



Obrázek 7.1 – Korekce vypočtené rychlosti vozidla

Pro korekci je využit následující vztah, je však potřeba alespoň orientačně znát úhel α :

$$v_{v_ose_vozovky} = v_{VOZIDLA} \cdot \cos(90^\circ - \alpha) \quad (7.2)$$

- 8) Nyní je již známa přesná rychlost vozidla ve směru osy vozovky a nezbývá nic jiného než ji zobrazit uživateli. Je tedy potřeba tento závěrečný výsledek vyslat prostřednictvím bloku rozhraní do zobrazovacího modulu. Zde můžeme využít sériový kanál 0 nebo 3 mikroprocesoru ATmega256.

Po vyslání dat do modulu zobrazovače se cyklus výpočtu rychlosti objektů opakuje od bodu 3). Program cyklicky určuje rychlost objektů, pokud je vypočtená rychlost menší než 10 km/hod není nic vysíláno k zobrazení. Pokud není rozdíl maximálního a minimálního vzorku větší než 315 (dekadicky) což odpovídá 200 mV není počítána fft ani nic vysíláno na displej neboť vstupní signál je považován za šum.

7.2 Aplikace bodů uvedených v oddílu 7.1 na danou situaci

Z velikosti záznějového kmitočtu lze odvodit vzorkovací kmitočet. Tento vzorkovací kmitočet by měl být dle Shonnon-Kotelnikova-Nyquistova kritéria minimálně dvojnásobný oproti maximálnímu kmitočtu vzorkovaného signálu. Čím je však vzorkovací kmitočet vyšší než kmitočet vzorkovaný, tím lépe. Uvažujeme-li maximální měřitelnou rychlost vozidel 200 kmh^{-1} a kmitočet měřicího mikrovlnného signálu $9,35 \text{ GHz}$, bude kmitočet záznějového signálu, tedy vzorkovaného signálu roven :

$$\Delta f = f_v \frac{2 \cdot v}{c}$$
$$\Delta f = \left\{ 9,35 \cdot 10^9 \frac{2 \cdot \frac{200}{3,6}}{3 \cdot 10^8} \right\}$$
$$\Delta f = 3463 \text{ Hz}$$

Musíme však dodržet podmínku pro vzorkovací kmitočet, kterým chceme vzorkovat záznějový signál o kmitočtu 3463 Hz . Tento vzorkovací kmitočet je potom :

$$f_{vz} \geq 2 \cdot \Delta f$$
$$f_{vz} \geq \{2 \cdot 3463\}$$
$$f_{vz} \geq 6926 \text{ Hz}$$

Zvolil jsem vzorkovací kmitočet 8 kHz . Z velikosti vzorkovacího kmitočtu lze určit periodu odebrání vzorků. Tato perioda udává dobu, za kterou musí být odebrán vzorek ze vstupního záznějového signálu, tento vzorek musí být převeden do digitální podoby, přenesen sběrnici do mikroprocesoru a uložen do interní paměti ATmega2560. Všechny tyto operace musí být splněny za dobu :

$$T_{vz} = \frac{1}{f_{vz}}$$
$$T_{vz} = \left\{ \frac{1}{8000} \right\}$$
$$T_{vz} = 125 \mu s$$

Tím je vyřešena otázka časování odběru vzorků, konkrétní hodnoty pro přednastavení časovače pro určení prodlevy mezi odběrem vzorků.

Následuje volba nastavení časování mikroprocesoru a s tím související nastavení rychlosti sériové linky. Dodaná zobrazovací jednotka je naprogramovaná na rychlost komunikaci rychlostí 9600 Baudů . Pro nastavení této rychlosti je vhodné použít krystal, u kterého nevznikne odchylka u časování sériové linky. U zvoleného typu mikroprocesoru je maximální hodnota použitého krystalu 16 MHz , zvolil jsem tedy krystal o kmitočtu 11.0592 MHz . Jestliže budeme brát v úvahu, že jedna instrukce je

vykonána během jednoho taktu tohoto oscilátoru (ovšem vykonání některých instrukcí zabírá více taktů oscilátoru), je patrné, že doba zpracování této instrukce činí :

$$T_{INSTRUKCE} = \frac{1}{f_{KRYSTAL}}$$

$$T_{INSTRUKCE} = \left\{ \frac{1}{11.0592 \cdot 10^6} \right\}$$

$$T_{INSTRUKCE} = 90.423 \text{ ns}$$

Konkrétní přednastavení registrů bude ukázáno v následující kapitole.

Zbývající část programu je vlastně jeho jádro, tedy vlastní výpočet FFT, určení maximálního kmitočtu ve spektru a z něj vypočítat skutečnou rychlost vozidla. Jedná se však pouze o matematické operace a jejich nejdůležitější vlastnost je doba jejich trvání. Tato doba je ovlivnitelná způsobem jejich realizace, rychlostí zpracovávání instrukcí a použitím vhodných datových typů proměnných. Tento rozbor bude proveden v následující kapitole.

7.3 Rozbor jednotlivých částí reálného funkčního programu mikrokontroléru

V této podkapitole je proveden detailní rozbor jednotlivých částí celého programu včetně vysvětlení nastavení registrů atd.

7.3.1 Programové ovládání AD převodníku

Jak bylo uvedeno v kapitole seznamující s parametry zvoleného AD převodníku, pro zahájení komunikace musí být signál /CONVST změněn z log1 na log0, poté je zapotřebí několik desítek ns vyčkat, než AD převodník sám uvede signál BUSY z log0 do log1. Během trvání BUSY v log1 je potřeba /CONVST opět nastavit na log1, tím docílíme situace, že AD převodník bude pracovat v módu 1. Mód 1 je nejrychlejší. Celý převod v tomto módu trvá 2 μ s. Po nastavení /CONVST na log1 je potřeba počkat až AD převodník nastaví signál BUSY zpět na log0. Poté je převod u konce na stačí nastavit signály /CS a /RD na log0. Tímto nastavením /CS a /RD aktivujeme výstupní zesilovače datových linek AD převodníku a na systémové sběrnici máme platná data převodu. Tato data je nyní potřeba načíst patřičnými bránami mikroprocesoru a uložit do paměti. Dále jen nastavit signály /CS a /RD zpět na log1.

Funkce pro jeden převod AD převodníku – její návratová hodnota je hodnota převodu :

```
int ADCRead(void)
{
    //promenne pro velicinu rychlosti
    int PREV, PREVOD0, PREVOD1;
    //nastavenim CONVST=PORTG.2 do log0 se spousti prevod
    clearbit(PORTG, 2);
    //je treba pockat az AD prevodnik nastavi signal BUSY na log1
    while (PING==0XEB) {}
}
```

```

//nastavenim CONVST na log1 se prepne mod na dobu prevodu cca 2us
setbit(PORTG,2);
//dale je potreba pockat az AD opet shodi BUSY na L
while (PORTG==0XFF) {}
//vynulovani signalu CS = aktivace CS
clearbit(PORTG,0);
//vynulovani signalu RD = aktivace RD
clearbit(PORTG,1);
//nacteni dat z portu D (nizsich 8 bit)
PREVOD0=PIND;
//nacteni dat z portu L (vyssi 4 bity)
PREVOD1=PINL;
//nastaveni RD = deaktivace RD
setbit(PORTG,1);
//nastavei CS = deaktivace CS
setbit(PORTG,0);
//bitovy posun o 8 pozic zajisti ze není třeba nasobit 256
PREVOD1<<=8;
//sloucení nízších 8b a vyšších 4b na celkových 12b
PREV=PREVOD1+PREVOD0;
//navratovou hodnotou funkce je 12b hodnota prevodu
return PREV;
}

```

Program (respektive funkce) uvedený výše však dokáže sejmout z AD převodníku pouze jednu hodnotu popisující velikost napětí na jeho vstupu dekadickou hodnotou 0 až 4095 ($2^{12}-1$). Podle rozboru v podkapitole 7.2 je zapotřebí odebrat 512 vzorků vstupního signálu a sice kmitočtem 8 kHz, tedy rozestup mezi dvěma uloženými vzorky je 125 μ s. Kontrola, kolik je přijatých vzorků je určena počítadlem, které je s každým nově uloženým vzorkem inkrementováno a je porovnáno s hodnotou 512. Volání funkce `ADCRead` je prováděno cyklicky na přerušení přetečením časovače a ten je vhodně přednastavován tak, že prodleva činí 125 μ s.

Nejprve po zapnutí modulu dochází k nastavování vnitřních registrů nastavujících používané interní obvody. Jedním z nich je již zmíněný čítač/časovač 1. Následující funkce provádí jeho počáteční nastavení :

```

//inicializace registru pro rizeni citace/casovace 1
void init_Timer()
{
    //nastaveni prodlevy na cca 125us => vzorkovani cca 8kHz
    TCNT1H=251;
    TCNT1L=50;
}

```

```

//povoleni vseh preruseni
SREG=0X80;
//povoleni preruseni citace/casovace1 zpusobene jeho pretecenim
TIMSK1=0X01;
//nastaveni registru pro volbu modu časovače na klasicky citaci mod
TCCR1A=0X00;
TCCR1C=0X00;
}

```

Vlastní funkce která je volána po přetečení čítače/časovače 1 :

```

//funkce volana pri aktivnim preruseni od pretecení citace/casovace 1
ISR(TIMER1_OVF_vect)
{
    //LED s nejnizsi vahou portu K je rozsvícena pri odberu vzorku – indikace
    PORTK=0XFE;
    //vypnutí casovacce
    TCCR1B=0X00;
    //prednastaveni jeho citacich regitru na prodlevu cca 125us
    TCNT1H=251;
    TCNT1L=50;
    //volani po prevodu od AD prevodniku a ulozeni do pole typu integer
    Real_int[COUNTER] = ADCRead();
    //spusteni casovace
    TCCR1B=0X01;
    //inkrementace pocitadla vzorku
    COUNTER++;
    //LED s nejnizsi vahou portu K je zhasnuta po odberu vzorku
    PORTK=0XFF;
}

```

7.3.2 Programové ovládání sériové linky

Sériová linka je co do používání vcelku jednoduchá integrované periférie mikroprocesoru. Nejprve se ve speciálních registrech provede její nastavení a vlastní vysílání dat je realizováno jen jejich zápisem do 8 bitového registru a indikace odeslání dat je opět speciálními bity v řídicích registrech sériové linky. Požadavkem pro zobrazování na dodaném sedmisegmentovém zobrazovači bylo nastavení sériové linky následující :

- asynchronní
- bez parity
- 1 stop bit
- 8 bitový přenos

Opět po zapnutí modulu musí dojít k nastavení registrů ovládajících vlastnosti sériového kanálu :

```
//inicializuje ridici registry serioveho portu
void init_Serial()
{
    //nastavuje vyssi registr pro baud rate – souvisi s kmitoctem uziteho krystalu
    UBRR3H=0X00;
    //nastavuje nizsi registr pro baud rate
    UBRR3L=0X47;
    //povoleni USART
    UCSR3B=0X18;
    //nastavi : asynchronni UART, bez parity, 1 stop bit, 8bit data
    UCSR3C=0X06;
}
```

Vlastní funkce pro vysílání dat sériovou linkou nejprve rozloží číslo určené k vyslání na jednotky, desítky a stovky a nelezena hodnota jejich ASCII znaku. Následuje vyslání konstanty “01“ pro navázání komunikace (oslovení), za touto konstantou jsou po sobě vysílány ASCII hodnoty stovek, desítek a jednotek a nakonec je vyslána konstanta “13“ neboli konec řádku = enter. Následuje vlastní funkce pro vysílání dat – je použito sériové linky číslo 3 :

```
//funkce vysle pomoci seriove linky udaj o rychlosti
void Vypis(int hodn)
{
    //promenne pro ulozeni jednotek, desitek a stovek z hodnoty rychlosti
    int ST0, DES, JED;
    //pokud vysilany udaj presahuje hodnotu 999 – maximální vysílatelnou, je tato
    //hodnota orezana na hodnotu 999
    if (hodn>999) hodn=999;
    //pokud je vysilany udaj mensi nez nula je vyslana hodnota 0
    if (hodn<0) hodn=0;
    //rozbory této velicíny na jednotky, desítky a stovky
    JED=hodn%10;
    hodn=(hodn - JED)/10;
    DES=hodn%10;
    hodn=(hodn - DES)/10;
    ST0=hodn%10;
    //prictením konstanty 0x30 se docílí převodu čísel na jejich ASCII hodnotu
    JED=JED+0X30;
    DES=DES+0X30;
    ST0=ST0+0X30;
}
```



```

//sekvence pro navazani spojeni – konstanta INICOM obsahuje hodnotu 01
UDR3=INICOM;
//cekani na potvrzeni odeslani znaku
while ( !(UCSR3A &(1<<UDRE3)) ) {}
//vyslani ASCII hodnoty stovek
UDR3=ST0;
// cekani na potvrzeni odeslani znaku
while ( !(UCSR3A &(1<<UDRE3))) {}
//vyslani ASCII hodnoty desitek
UDR3=DES;
// cekani na potvrzeni odeslani znaku
while ( !(UCSR3A &(1<<UDRE3))) {}
//vyslani ASCII hodnoty jednotek
UDR3=JED;
// cekani na potvrzeni odeslani znaku
while ( !(UCSR3A &(1<<UDRE3))) {}
//odeslani znaku ukoncujiho sekvenci dat – ENDCOM obsahuje konstantu 13
UDR3=ENDCOM;
// cekani na potvrzeni odeslani znaku
while ( !(UCSR3A &(1<<UDRE3))) {}
}

```

7.3.3 Programové řešení výpočtu rychlosti z naměřených vzorků

Nejprve jsou hodnoty odebraných vzorků zkopírovány z pole typu integer do pole typu float. Pole integer bylo výhodnější při ukládání dat ve funkci volané při přerušení čítače/časovače 1, neboť při přímém ukládání do pole float trval tento proces mnohonásobně déle a došlo dokonce k překročení doby 125 μ s a tedy ke snížení vzorkovacího kmitočtu. Během kopírování polí jsou zjišťovány minimální a maximální hodnoty v poli vzorků. Je-li jejich rozdíl menší než 328 (odpovídá hodnotě 200 mV), není vůbec volána neboť vstupní signál je považován za šum a žádná hodnota není vysílána na displej. Rovněž není žádná hodnota vysílána na displej pokud je hodnota naměřené rychlosti menší než 10 km/hod.

Z důvodu velikosti kódu pro výpočet rychlosti ze vzorků signálu se zde omezím pouze na popis dané funkce. Funkce `fft_but()` slouží k výpočtu FFT nad polem 512 vstupních reálných hodnot, čímž dojde k převedení získaného navzorkovaného průběhu z časové do frekvenční oblasti. Pro výpočet FFT je použito výpočtů dílčích motýlků, neboli komplexního násobení. Jelikož je realizováno komplexní násobení, je potřeba dvou polí o velikosti 512 buněk, jedno pro reálné a druhé pro imaginární složky. Reálné pole je naplněno vzorky převodu, imaginární je na počátku vynulováno. Pro realizaci komplexního násobení a jeho urychlení jsou v paměti programu trvale uloženy konstanty funkcí sinus a kosinus. Z důvodu zjednodušení algoritmů je v paměti uloženo 256 hodnot funkcí sinus a 256 hodnot funkcí kosinus, jedná se o sudé hodnoty vzorků v intervalu 0, 2, 4 až 511. Vzhledem k periodicitě je uvažován pouze průběh

harmonických signálů sinu a kosinu v intervalu 0 rad až π rad. Tento interval je rozdělen na 512 hodnot (0 až 511). Nultému vzorku odpovídá úhel 0° a vzorku 510 odpovídá úhel $179,3^\circ$.

Po vypočtení motýlků jsou v imaginárním a reálném poli uloženy komplexní hodnoty udávající velikosti jednotlivých spektrálních čar. Tyto spektrální čáry jsou však přeházeny a jsou tedy dále uspořádány tak jak v posloupnosti patří. Jejich indexy v polích jsou bitově invertovány.

Jakmile jsou velikosti frekvenčních čar uspořádány, nalezneme se dominantní frekvenční čára (má největší modul). Z hledání je vypuštěna stejnosměrná složka (index 0). Tento modul je potřeba počítat jako odmocninu z součtu kvadrátů reálné a imaginární složky, jenže pro mikroprocesor je realizace odmocniny obtížná, je tedy pro porovnání modulů využito pouze součtu kvadrátů reálné a imaginární složky. Index spektrální čáry s největším modulem je pak vynásoben vzdáleností spektrálních čar, která se určí podílem vzorkovacího kmitočtu a počtu vzorků snížených o 1. V tomto konkrétním případě je index násoben hodnotou 15,66 Hz. Výsledkem je kmitočet záznamového signálu. Pro určení vlastní rychlosti je ještě potřeba užít vztahu :

$$v = \frac{\Delta f \cdot c}{2 \cdot f_v} = \frac{3 \cdot 3.6}{2 \cdot 9.35} = 0.5775$$

$$v = \frac{\Delta f \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 9.35 \cdot 10^9} = \Delta f \cdot \frac{3}{187} = 0.01604 \cdot \Delta f \quad \{m \cdot s^{-1}\} = 0.05775 \cdot \Delta f \quad \{km \cdot hod^{-1}\}$$

Je-li výsledná hodnota rychlosti menší než 10 km/hod, je návratová hodnota funkce rovna nule a tato není z hlavní funkce programu vyslána na displej. Při vyšší nebo rovné rychlosti než 10 km/hod je návratovou hodnotou funkce tato vypočtená rychlost.

Celý kód funkce pro výpočet FFT a určení rychlosti je uložen na doprovodném CD stejně jako celý zbytek ovládacího programu mikroprocesoru.

7.3.4 Funkce MAIN programu

V této hlavní funkci programu je nejprve volána funkce sdružující všechny inicializační funkce, tj inicializaci sériové linky, inicializaci čítače/časovače a počáteční nastavení signálů pro ovládání AD převodníku. Následuje přechod do nekonečné smyčky, ve které se nejprve načte 512 vzorků vstupního signálu. Pomocí přerušení od časovače je dodržen vzorkovací kmitočet 8 kHz a pomocí počítadla vzorků je dodržen jejich počet 512. Následuje překopírování uložených vzorků z pole integer do pole float a současně je hledán nejmenší a největší vzorek, ze kterých je potom vypočten jejich rozdíl neboli amplituda. Pokud je hodnota amplitudy menší než 328, což odpovídá hodnotě 200 mV není volána funkce pro výpočet FFT a rychlosti a na displej není nic posíláno k zobrazení. Rovněž nic není vysíláno na displej při rychlosti menší než 10 km/hod. Pokud ovšem amplituda nabývá větší hodnoty než 328 dojde k volání funkce `fft_but()`, jejíž návratová hodnota je vypočtená rychlost a tato je pomocí funkce `Vypis()` vyslána k zobrazení na displej.

```

//hlavni funkce programu
int main(void)
{
    int i,max,min,amplituda,_rychl;
    //nastavi port K jako vystupni
    DDRK=0XFF;
    //a vypise na nej same jednicky = LED nesviti
    PORTK=0XFF;
    //pocatecni nastaveni registru pouzivanych periferii
    init();
    //hlavni nekonecna smycka
    while(1)
    {
        //prednastaveni citacich registru casovace1 na prodlevu cca 125us
        TCNT1H=251;
        TCNT1L=50;
        //nastavi pocitadlo vzorku na 0
        COUNTER = 0;
        //spusti citac/casovac 1 (bez jakéhokoli preddelice)
        TCCR1B=0X01;
        //dokud je pocet nactenych vzorku z AD mensi nez 512 cte se dalsi
        //vzorek
        while (COUNTER < SAMPLE_CNT) {}
        //vypnuti citace/casovace 1
        TCCR1B=0X00;
        //pocatecni nastaveni promenne pro ulozeni maximalni hodnoty z AD
        max=0;
        //pocatecni nastaveni promenne pro ulozeni minimalni hodnoty z AD

        min=4096;
        //pocatecni nastaveni promenne pro ulozeni amplitudy

        amplituda=0;
        //kopirovani integer pole do pole float a hledani max a min vzorku
        for (i=0;i<SAMPLE_CNT;i++)
        {
            RealIn[i]=Real_int[i];
            ImagIn[i]=0;
            if (max<Real_int[i]) max=Real_int[i];
            if (min>Real_int[i]) min=Real_int[i];
        }
        //vypocet amplitudy mereneho signalu
        amplituda=max-min;
        //pokud je amplituda vesti nez 328 => 200mV pak je provedeno fft a
        //zobrazen vysledek pokud je
        if (amplituda>328)
    }
}

```

```

        {//pak zároveň větší než 10km/hod, je však třeba brát v
// úvahu špičky v signálu...
        _rychl = fft_but(RealIn, ImagIn, SAMPLE_CNT);
        //pokud je _rychl==0 pak je chytaný nějaký šmejd signál a
//neposílá se nic na babu
        if (_rychl!=0) Vypis(_rychl);
    }
}

```

7.3.5 Časové relace programu a paměťové nároky

Celý program byl vyvíjen v prostředí AVRStudio, které je distribuováno firmou Atmel, jejíž mikroprocesor ATmega2560 je použit v tomto modulu. V tomto oddílu jsou uvedeny časové relace jednotlivých částí programu a paměťové nároky.

Časové relace :

- doba trvání počáteční inicializace = 4,54 ms
- doba načtení 512 vzorků do pole typu integer = 64 ms
- doba trvání výpočtu FFT a výpočtu rychlosti vozidla = 1,25 s
- celková doba od zapnutí přes inicializace až po vyslání prvního výsledku na displej = 1,32 s

Nároky na paměť :

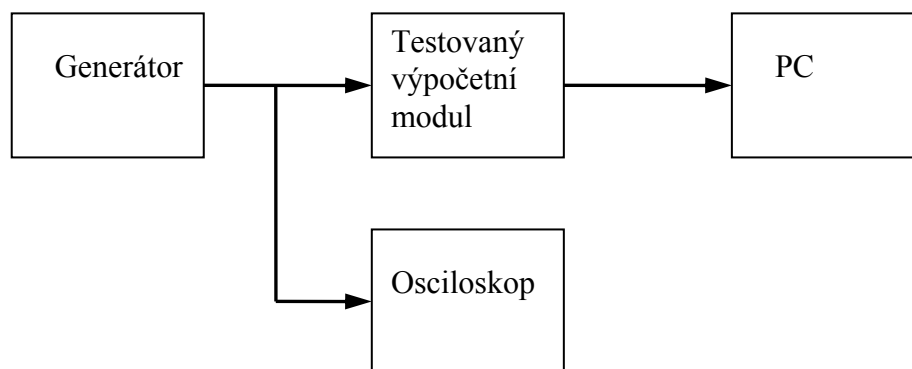
- paměť programu : 16050 B = 16,05 kB (z celkové kapacity paměti programu 256 kB zabírá program 6,1 %)
- paměť dat : 5390 B = 5,39 kB (z celkové kapacity paměti RAM datové proměnné zabírají 65,8 %)

8. Ověření funkčnosti navrženého modulu měřením

V této kapitole jsou uvedeny výsledky ověřování funkčnosti navrženého a realizovaného modulu. Modul pro zpracování dat byl testován jak v laboratorních podmínkách tak i v reálném případě měření rychlosti vozidla.

8.1 Ověřování funkčnosti modulu v laboratorních podmínkách

Realizovaný modul byl připojen k napájecímu napětí 5 V, na analogový vstup bloku AD převodníku je namísto záznejového kmitočtu z vysokofrekvenčního modulu přiváděn signál z generátoru pro simulování tohoto záznejového signálu. Výstupní naměřená rychlost byla zprvu vysílána na zapůjčený displej (jenž bude použit při vlastním nasazení radaru v dopravním provozu) a posléze byla tato data čtena prostřednictvím sériového portu PC. Pro kontrolu a správné nastavení vstupního signálu generátoru byl tento signál ještě připojen k osciloskopu. Schéma měřicího pracoviště je na obrázku 8.1.



Obrázek 8.1 – Schéma zapojení měřicího pracoviště v laboratorních podmínkách

V rámci testování modulu v laboratoři byly provedeny měření určující závislost vypočtené rychlosti na některém parametru simulovaného záznejového signálu. Tímto parametrem je například kmitočet signálu z generátoru či jeho amplituda.

8.1.1 Závislost vypočtené rychlosti na kmitočtu simulovaného záznejového signálu

Během tohoto měření zůstala amplituda harmonického signálu použitého pro simulaci záznejového signálu z VF modulu konstantní stejně tak jako stejnosměrný posun signálu. AD převodník je schopen převádět analogové napětí pouze v případě, že jeho hodnota spadá do intervalu 0 V až 2,5 V. Z tohoto důvodu bylo použito stejnosměrného posunu harmonického signálu do měřitelného intervalu napětí.

Tabulka 8.1 – Závislost vypočteného kmitočtu na velikosti kmitočtu záznejového signálu

$U_{P-P} = 350 \text{ mV}$, $U_{\text{OFFSET}} = 175 \text{ mV}$

Δf [Hz]	$V_{\text{očekávaná}}$ [km/hod]	$V_{\text{naměřená}}$ [km/hod]	Δv [km/hod]	δv [%]
100	5.8	5.0	0.8	13.4
200	11.6	11.0	0.6	4.8
300	17.3	18.0	-0.7	-3.9
400	23.1	23.0	0.1	0.4
500	28.9	28.0	0.9	3.0
600	34.7	34.0	0.7	1.9
700	40.4	40.0	0.4	1.1
800	46.2	47.0	-0.8	-1.7
900	52.0	52.0	0.0	0.0
1000	57.8	57.0	0.8	1.3
1100	63.5	63.0	0.5	0.8
1200	69.3	69.0	0.3	0.4
1300	75.1	76.0	-0.9	-1.2
1400	80.9	82.0	-1.1	-1.4
1500	86.6	86.0	0.6	0.7
1600	92.4	92.0	0.4	0.4
1700	98.2	98.0	0.2	0.2
1800	104.0	105.0	-1.0	-1.0
1900	109.7	110.0	-0.3	-0.2
2000	115.5	115.0	0.5	0.4
2100	121.3	121.0	0.3	0.2
2200	127.1	127.0	0.1	0.0
2300	132.8	134.0	-1.2	-0.9
2400	138.6	140.0	-1.4	-1.0
2500	144.4	144.0	0.4	0.3
2600	150.2	150.0	0.2	0.1
2700	155.9	156.0	-0.1	0.0
2800	161.7	163.0	-1.3	-0.8
2900	167.5	169.0	-1.5	-0.9
3000	173.3	173.0	0.3	0.2

Příklad výpočtů :

- teoreticky vypočtená rychlost :

$$v_{\text{očekávaná}} = 0.057754 \cdot \Delta f$$

$$v_{\text{očekávaná}} = \{0.057754 \cdot 1000\}$$

$$v_{\text{očekávaná}} = 57.8 \text{ km} \cdot \text{hod}^{-1}$$

- odchylka rychlosti vypočítané modulem od rychlosti teoreticky vypočtené :

$$\Delta v = v_{\text{očekávaná}} - v_{\text{naměřená}}$$

$$\Delta v = \{57.8 - 57\}$$

$$\Delta v = 0.8 \text{ km} \cdot \text{hod}^{-1}$$

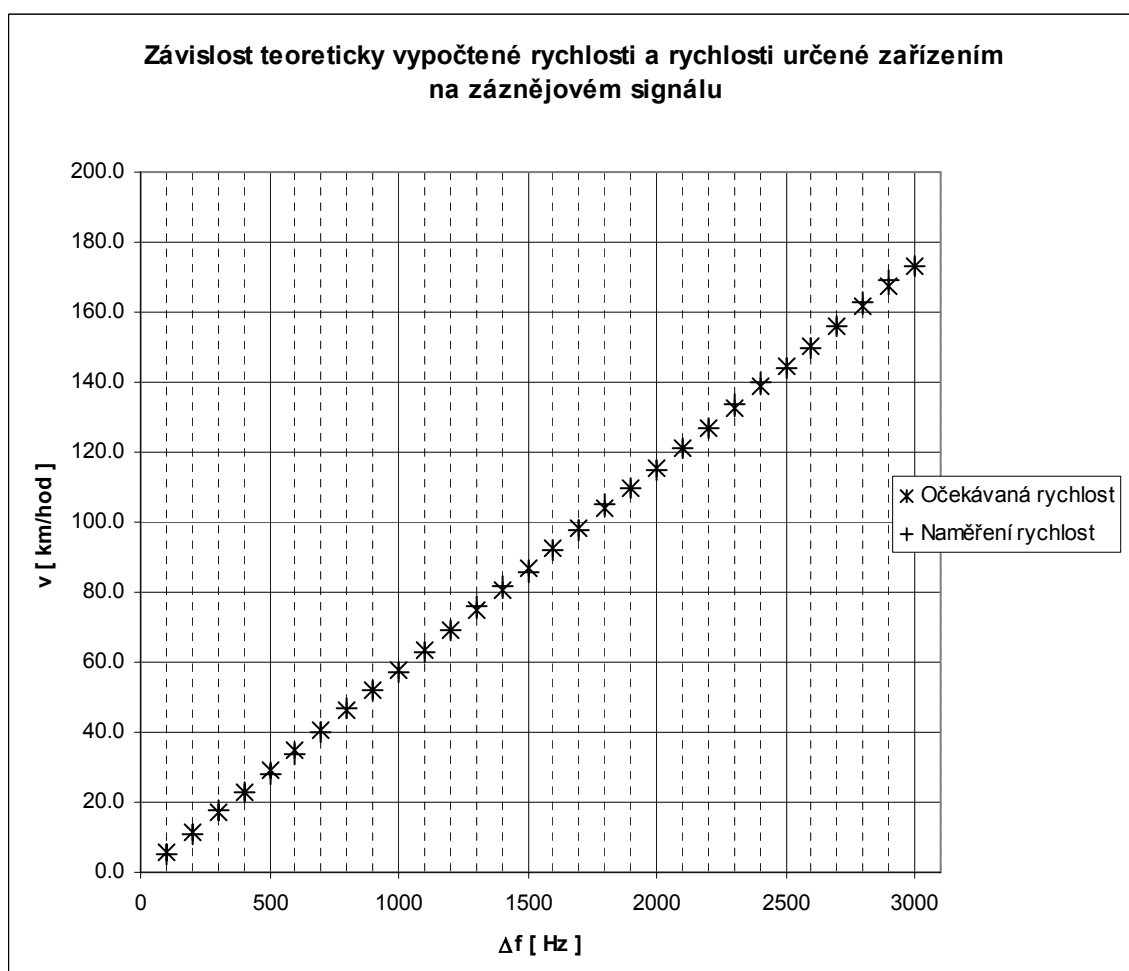
- procentuální vyjádření odchylky :

$$\delta v = \frac{v_{ocekavana} - v_{namerena}}{v_{ocekavana}} \cdot 100$$

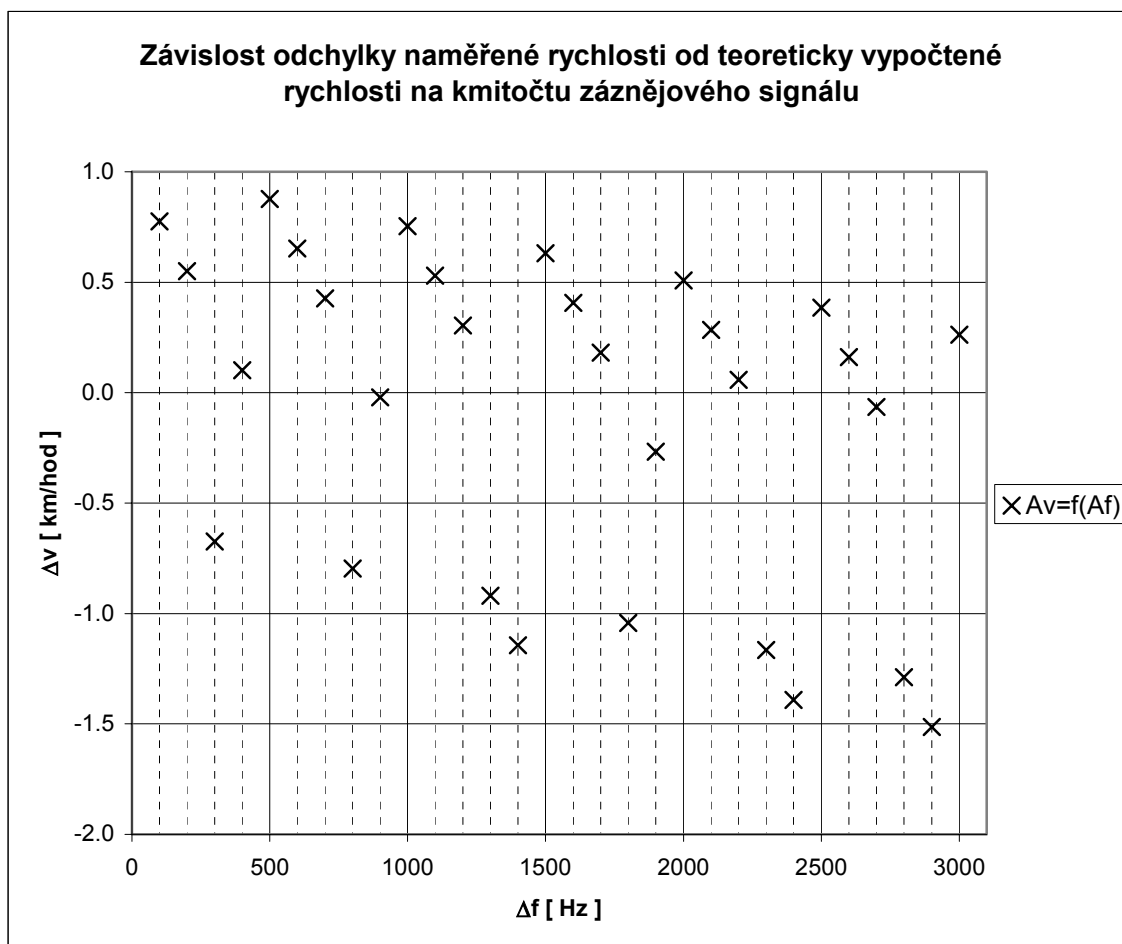
$$\delta v = \left\{ \frac{57.8 - 57}{57.8} \cdot 100 \right\}$$

$$\delta v = 1.3 \%$$

Vzniklá odchylka od teoreticky očekávané hodnoty je způsobena jednak odříznutím desetinné části výsledku a jednak zaokrouhlováním při výpočtech FFT v mikroprocesoru. *Obrázek 8.2* ukazuje grafické znázornění závislosti obou rychlostí na záznějovém kmitočtu. Při této velikosti však není dobře patrná odchylka obou rychlostí. Tato odchylka Δv je graficky vynesena v závislosti na záznějovém kmitočtu v *obrázku 8.3*.



Obrázek 8.2 – Grafické znázornění závislosti teoreticky vypočtené rychlosti a rychlosti vypočtené navrženým modulem



Obrázek 8.3 – Grafické znázornění závislosti rozdílu teoreticky vypočtené rychlosti a rychlosti vypočtené modulem na kmitočtu záznejového signálu

Z tabulky 8.1 i obrázku 8.3 plyne, že maximální hodnota odchylky činí -1,5 km/hod a nastává u očekávané rychlosti 167,5 km/hod.

8.1.2 Závislost vypočtené rychlosti na amplitudě simulovaného záznejového signálu

Pro tři hodnoty kmitočtu záznejového signálu (200 Hz, 1 kHz a 2 kHz) byla změřena závislost rychlosti vypočtené navrženým modulem na velikosti amplitudy záznejového signálu.

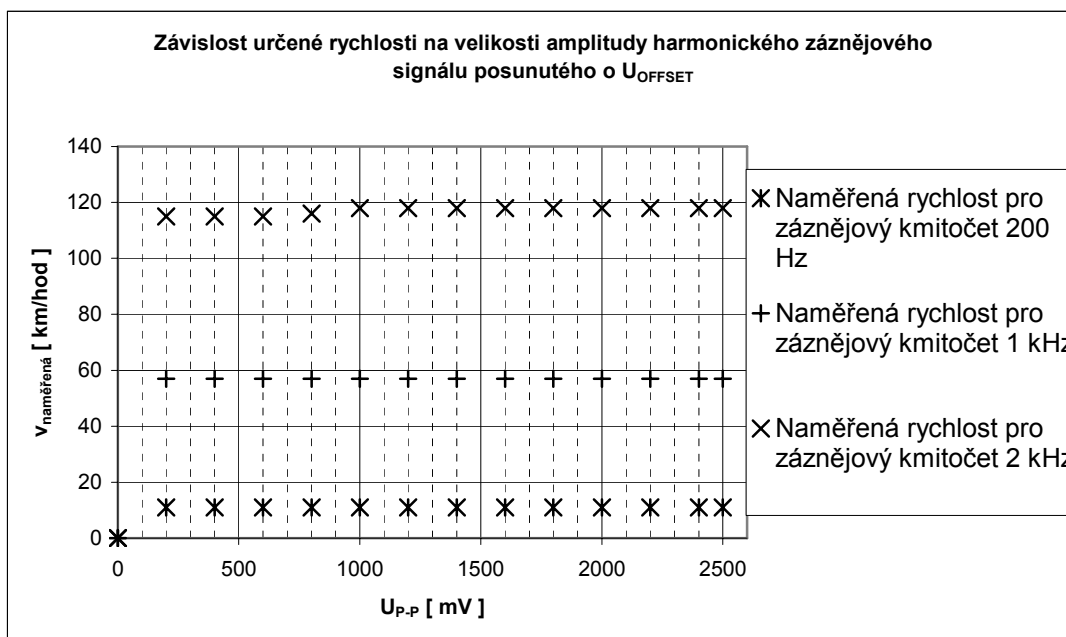
Velikost rozkmitu záznejového signálu byla měněna v celém měřitelném rozsahu AD převodníku (tj. 0 V až 2,5 V) a stejnosměrný posun činil vždy polovinu toho rozkmitu.

V tabulce 8.2 jsou uvedeny hodnoty modulem vypočtené rychlosti.

Tabulka 8.2 – Závislost vypočteného kmitočtu na velikosti amplitudy záznejového signálu

U_{P-P}	U_{OFFSET}	$\Delta f = 200 \text{ Hz}$, $v_{teoretická} = 11.6 \text{ km/hod}$	$\Delta f = 1 \text{ kHz}$, $v_{teoretická} = 57.8 \text{ km/hod}$	$\Delta f = 2 \text{ kHz}$, $v_{teoretická} = 115.5 \text{ km/hod}$
		$v_{naměřená}$	$v_{naměřená}$	$v_{naměřená}$
[mV]	[mV]	[km/hod]	[km/hod]	[km/hod]
0	0	0	0	0
200	100	11	57	115
400	200	11	57	115
600	300	11	57	115
800	400	11	57	116
1000	500	11	57	118
1200	600	11	57	118
1400	700	11	57	118
1600	800	11	57	118
1800	900	11	57	118
2000	1000	11	57	118
2200	1100	11	57	118
2400	1200	11	57	118
2500	1250	11	57	118

Grafické znázornění vypočtené rychlosti na velikosti rozkmitu vstupního záznejového signálu pro tři zvolené kmitočty tohoto signálu zobrazuje *obrázek 8.4*.



Obrázek 8.4 – Grafické znázornění závislosti vypočtené rychlosti na rozkmitu záznejového signálu

Z tabulky 8.2 a obrázku 8.4 je zřejmá stabilita výpočtu rychlosti modulem pro kmitočty záznejového signálu 200 Hz a 1 kHz. U těchto kmitočtů je hodnota vypočtené

rychlosti stále stejná pro všechny hodnoty velikosti vstupního záznějového kmitočtu kromě velikosti 0 mV což znamená 0 km/hod.

U kmitočtu záznějového signálu 2 kHz již tato stálost není tak vynikající, neboť pro velikost záznějového kmitočtu 0 mV až 600 mV je určena rychlost 115 km/hod a v rozsahu 1 V až 2,5 V je tato rychlost vyhodnocena jako 118 km/hod. Odchylka však v absolutní hodnotě nepřesahuje 1,5 km/hod.

8.1.3 Závislost vypočtené rychlosti na tvaru průběhu záznějového signálu a jeho kmitočtu

Pro tři různé typy průběhů (harmonický, trojúhelníkový a obdélníkový) byla změřena závislost vypočtené rychlosti na velikosti kmitočtu záznějového signálu, stejnosměrně posunutého o polovinu rozkmitu tohoto záznějového signálu.

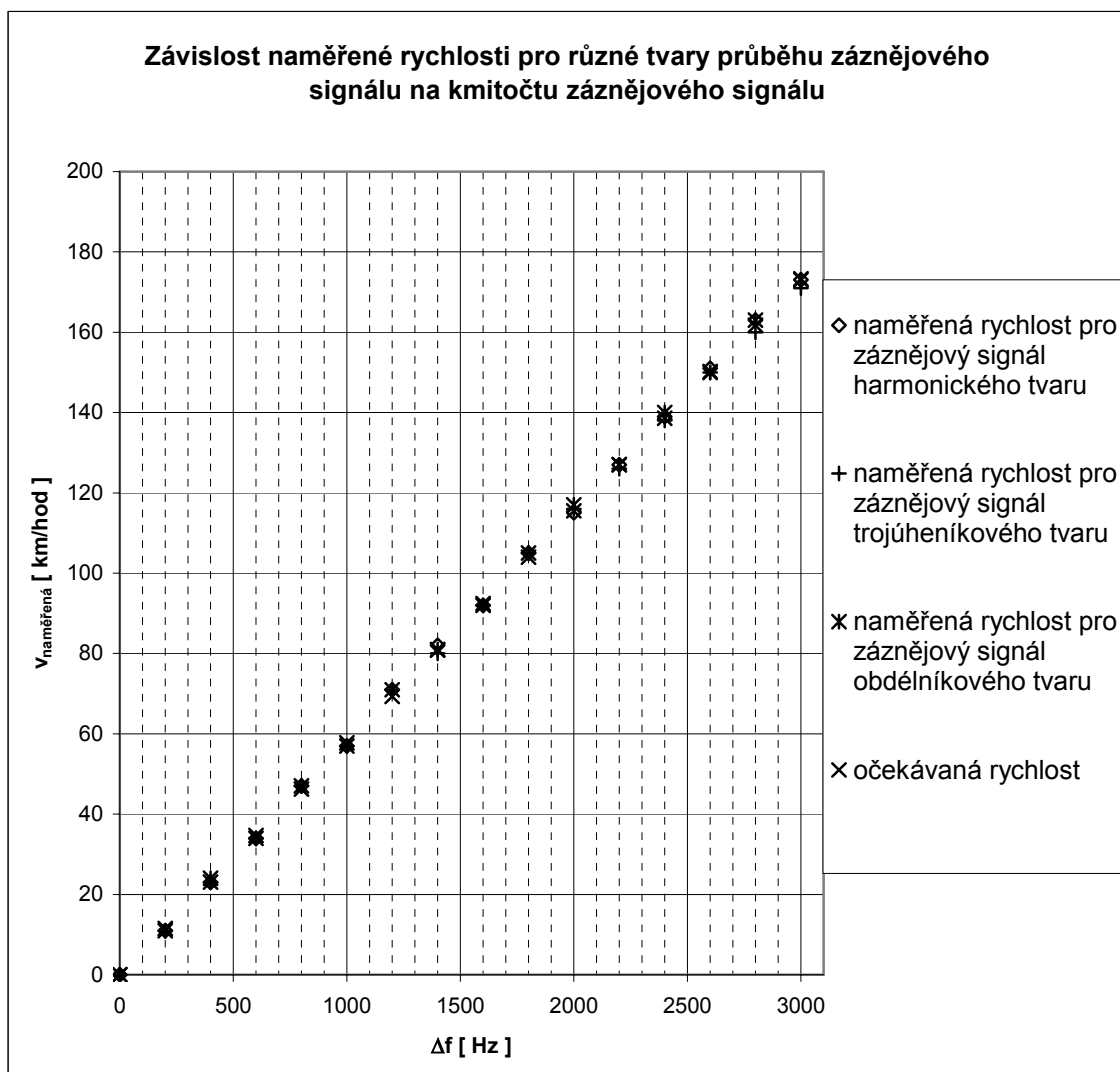
V *tabulce 8.3* jsou shrnuty naměřené hodnoty a vypočtena jejich odchylka od teoreticky očekávané hodnoty rychlosti.

Tabulka 8.3 – Závislost vypočteného kmitočtu pro různé průběhy záznějového signálu na velikosti amplitudy záznějového signálu

$U_{P-P} = 500 \text{ mV}$, $U_{\text{OFFSET}} = 250 \text{ mV}$

Δf [Hz]	$V_{\text{očekávaná}}$ [km/hod]	$V_{\text{naměřená}}$ [km/hod]			$\Delta V_{\text{naměřená}}$ [km/hod]		
		sinus	trojúhelník	obdélník	sinus	trojúhelník	obdélník
0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
200	11.6	11	11	11	0.6	0.6	0.6
400	23.1	23	23	24	0.1	0.1	-0.9
600	34.7	34	34	34	0.7	0.7	0.7
800	46.2	47	47	47	-0.8	-0.8	-0.8
1000	57.8	57	57	57	0.8	0.8	0.8
1200	69.3	71	71	71	-1.7	-1.7	-1.7
1400	80.9	82	80	81	-1.1	0.9	-0.1
1600	92.4	92	92	92	0.4	0.4	0.4
1800	104.0	105	105	105	-1.0	-1.0	-1.0
2000	115.5	115	116	117	0.5	-0.5	-1.5
2200	127.1	127	126	127	0.1	1.1	0.1
2400	138.6	139	138	140	-0.4	0.6	-1.4
2600	150.2	151	150	150	-0.8	0.2	0.2
2800	161.7	163	160	163	-1.3	1.7	-1.3
3000	173.3	173	171	173	0.3	2.3	0.3

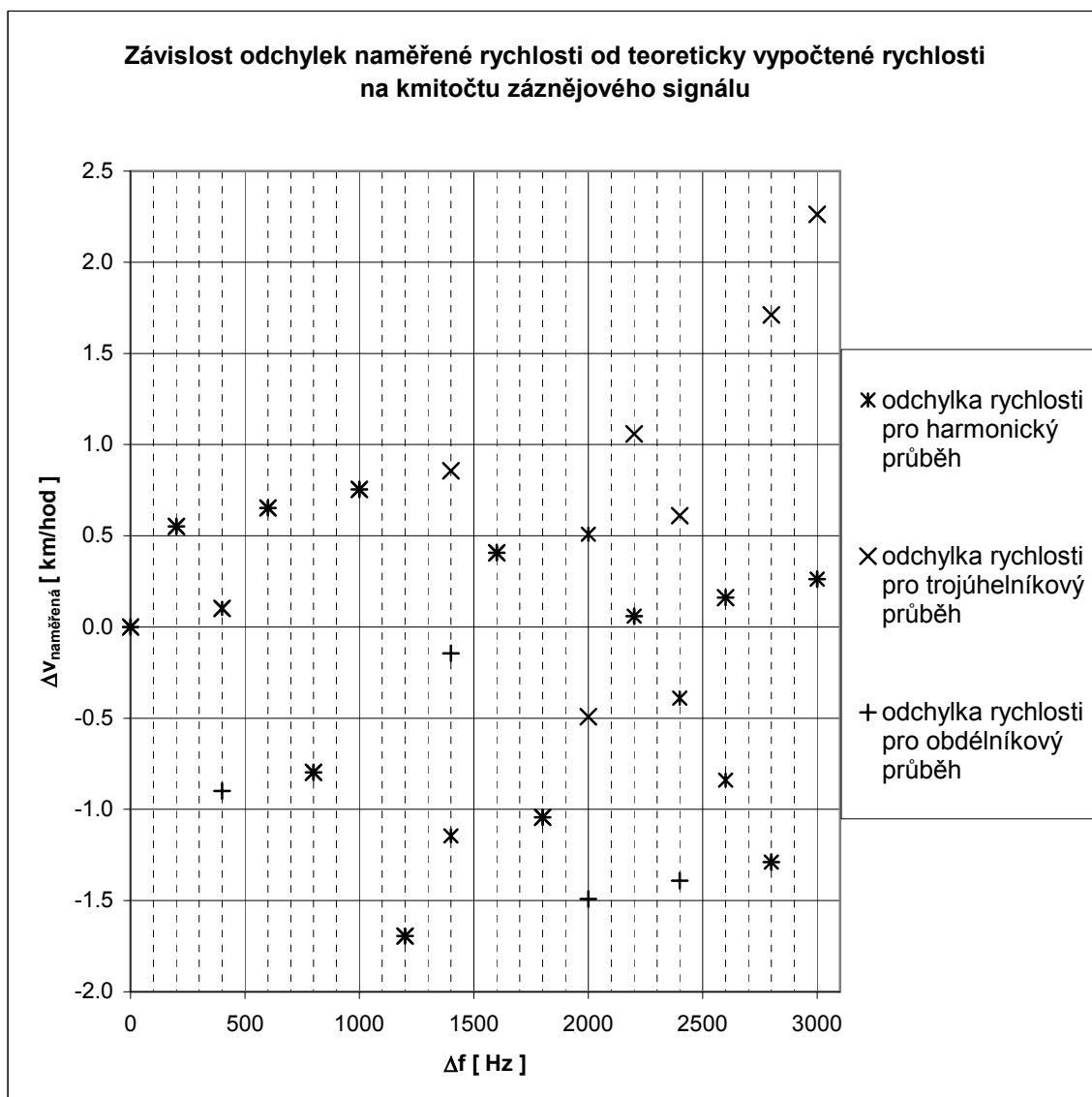
Grafické znázornění vypočtené rychlosti na velikosti kmitočtu vstupního záznějového signálu pro různé časové průběhy tohoto signálu zobrazuje *obrázek 8.5*.



Obrázek 8.5 – Grafické znázornění závislosti vypočtené rychlosti a teoretické rychlosti na velikosti kmitočtu záznejového signálu různých časových průběhů

Z obrázku 8.5 však nejsou příliš dobře patrné odchylky modulem vypočtených rychlostí od rychlosti pro daný kmitočet záznejového signálu očekávané. V obrázku 8.6 je vynesena závislost odchylek hodnot modulem vypočtených rychlosti pro jednotlivé časové průběhy v závislosti na kmitočtu záznejového signálu.

Odchylky vynesené v obrázku 8.6 nemají větší absolutní hodnotu než 1,7 km/hod.



Obrázek 8.6 – Grafické znázornění závislosti rozdílu teoreticky vypočtené rychlosti a rychlosti vypočtené modulem na kmitočtu záznejového signálu pro různé časové průběhy záznejového signálu

Z tohoto měření vyplývá skutečnost, že ani jeden z použitých průběhů signálu nemá podstatný vliv na zhoršení přesnosti výpočtu rychlosti vozidel prostřednictvím navrženého modulu. Rychlost je vcelku spolehlivě určována až do záznejového kmitočtu 3 kHz, což odpovídá rychlosti 173,3 km/hod.

Odchyly od očekávané velikosti rychlosti jsou částečně způsobeny oříznutím desetinné části modulem vypočtené rychlosti a zaokrouhlováním při výpočtech v mikroprocesoru.

8.1.4 Měření odběru modulu

Během měření odběru byl modul připojen ke zdroji stabilizovaného napětí 5 V (sám modul obvody pro stabilizaci napájecího napětí neobsahuje). Během připojení bloku mikroprocesoru k napájecímu napětí vykonával mikroprocesor cyklický program pro určení rychlosti vozidla z kmitočtu záznějového signálu.

Odběr jednotlivých bloků (případně jejich kombinací) popisuje *tabulka 8.4*.

Tabulka 8.4 – Odběr bloků modulu zpracování dat záznějového kmitočtu

Blok	I
	[mA]
Blok AD převodu	10
Blok rozhraní	13
Blok mikroprocesoru	40
Celý modul z propojených bloků	63

Odběr obvodů vstupní úpravy signálu je odhadován na maximální hodnotu 300 mA. Jedná se o obvody filtru pásmové propusti a obvody automatického řízení zesílení.

8.2 Ověřování funkčnosti modulu v reálných podmínkách

Realizovaný modul byl napájen prostřednictvím autobaterií. Pro dosažení potřebné úrovně napájecího napětí jednotlivých obvodů zařízení bylo využito obvodů určených pro stabilizaci napájecího napětí, uvedených v kapitole 5.1.

Naměřené hodnoty rychlosti měřeného vozidla se od hodnot rychlosti určených tachometrem vozidla lišily jen minimálně. Odchylka těchto rychlostí byla maximálně 5 km/hod, což může být odchylka způsobená nepřesností tachometru.

9. Závěr

Cílem této diplomové práce byl kompletní návrh schémat zapojení a desek plošných spojů výpočetního modulu pro zpracování záznějových radarových signálů a modulu vstupní úpravy záznějového kmitočtu. Rovněž byl napsán a odzkoušen program signálového procesoru výpočetního modulu tohoto dopplerovského radaru pro měření rychlosti.

V této práci byl proveden rozbor problematiky Dopplerovského radaru, návrh schéma zapojení a desek plošných spojů výpočetního modulu určeného pro zpracování záznějového signálu. Práce obsahuje popis realizace tohoto navrhovaného modulu jako i poslední bod zadání týkající se rozboru programu mikroprocesoru. Dále je v této práci realizován návrh modulu vstupní úpravy záznějového signálu – volba senzoru, návrh obvodu filtrace záznějového signálu a návrh obvodu automatického zesílení již vyfiltrovaného signálu. Signál jenž je výstupem obvodu automatického řízení zesílení je přiváděn na vstup výpočetního modulu, konkrétněji na vstup bloku AD převodníku.

Obvod pro zpracování záznějových signálů je rozdělen na tři samostatné bloky komunikující mezi sebou prostřednictvím systémové sběrnice. Tyto dílčí části jsou blok AD převodu, blok mikroprocesoru a blok rozhraní.

Název jednotlivých bloků napovídá co je jejich hlavním úkolem. Blok AD převodu zajišťuje převod vstupního analogového záznějového radarového signálu na jeho číslíkovou reprezentaci. Blok mikroprocesoru slouží jako výpočetní a řídicí jednotka celého systému. Tento blok z naměřených vzorků záznějového radarového signálu vypočítá rychlost pohybujícího se objektu a tuto dále vyšle k zobrazení. Blok rozhraní slouží pro komunikaci s externím zařízením – nejčastěji se zobrazovací jednotkou prostřednictvím rozhraní RS232.

Výsledkem této práce je souhrn podkladů pro návrh a výrobu dopplerovského radaru pro měření rychlosti vozidel. Podklady týkající se výpočetního modulu obsahují schéma zapojení, osazovací plány, předlohy pro výrobu desek plošných spojů, kusovníky, popis sběrnicevého systému z hlediska propojení desek plošných spojů. Podklady týkající se modulu úpravy vstupního signálu pak schéma zapojení a kusovníky. Rovněž bylo splněno zadání ve směru realizace ovládacího programu signálového mikroprocesoru a nastíněny požadavky na proudový odběr z napájecího zdroje při uvažování maximálního odběru použitých obvodů obou navrhovaných modulů.

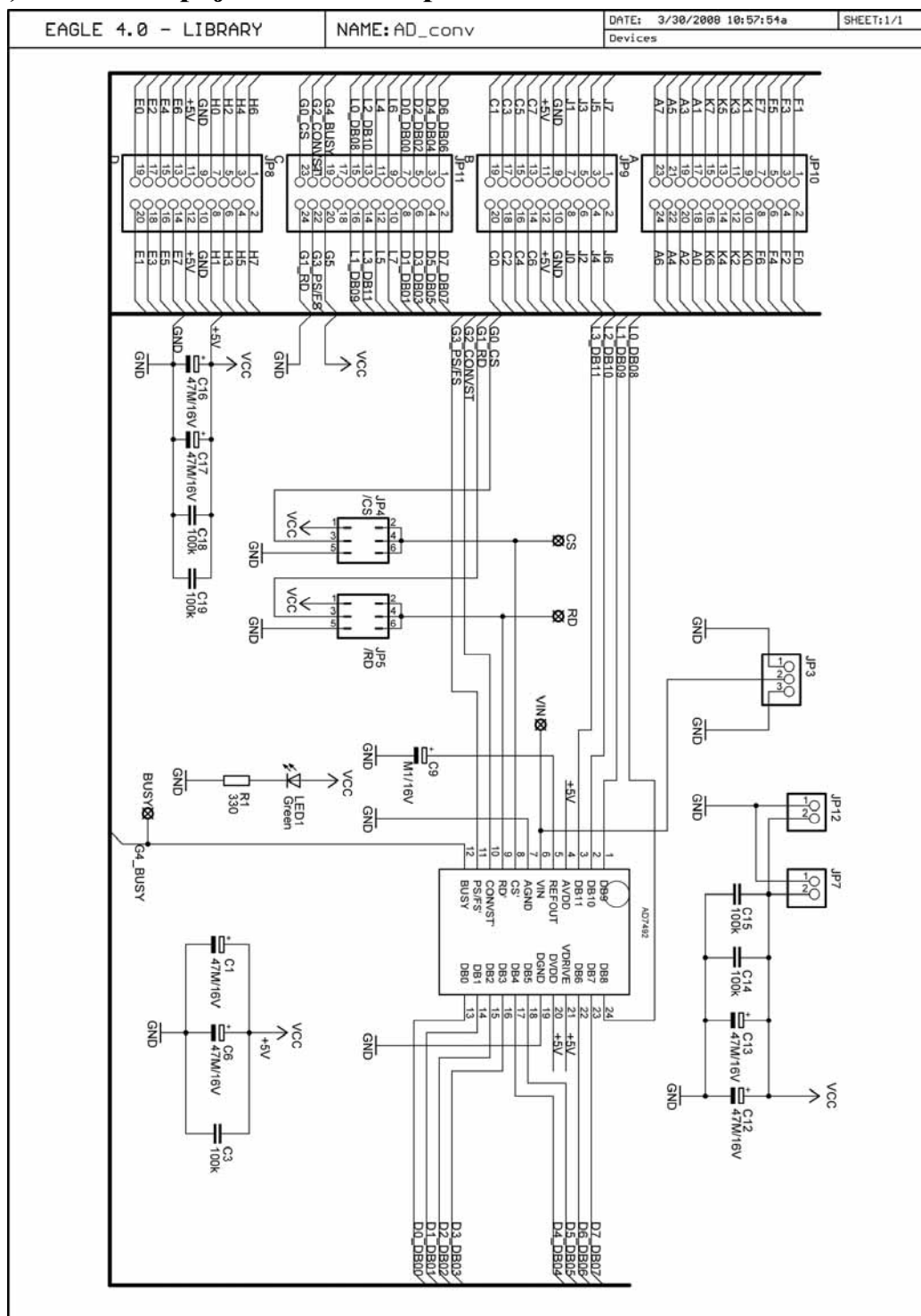
Výsledkem této práce je realizovaný funkční dopplerovský radar pro měření rychlosti vozidel včetně testovacích měření v laboratoři (maximální odchylka spadá do intervalu ± 1 km/hod). V reálném měření odchylka splnila zadání a byla do ± 3 km/hod vůči tachometru testovaného vozidla.

Literatura

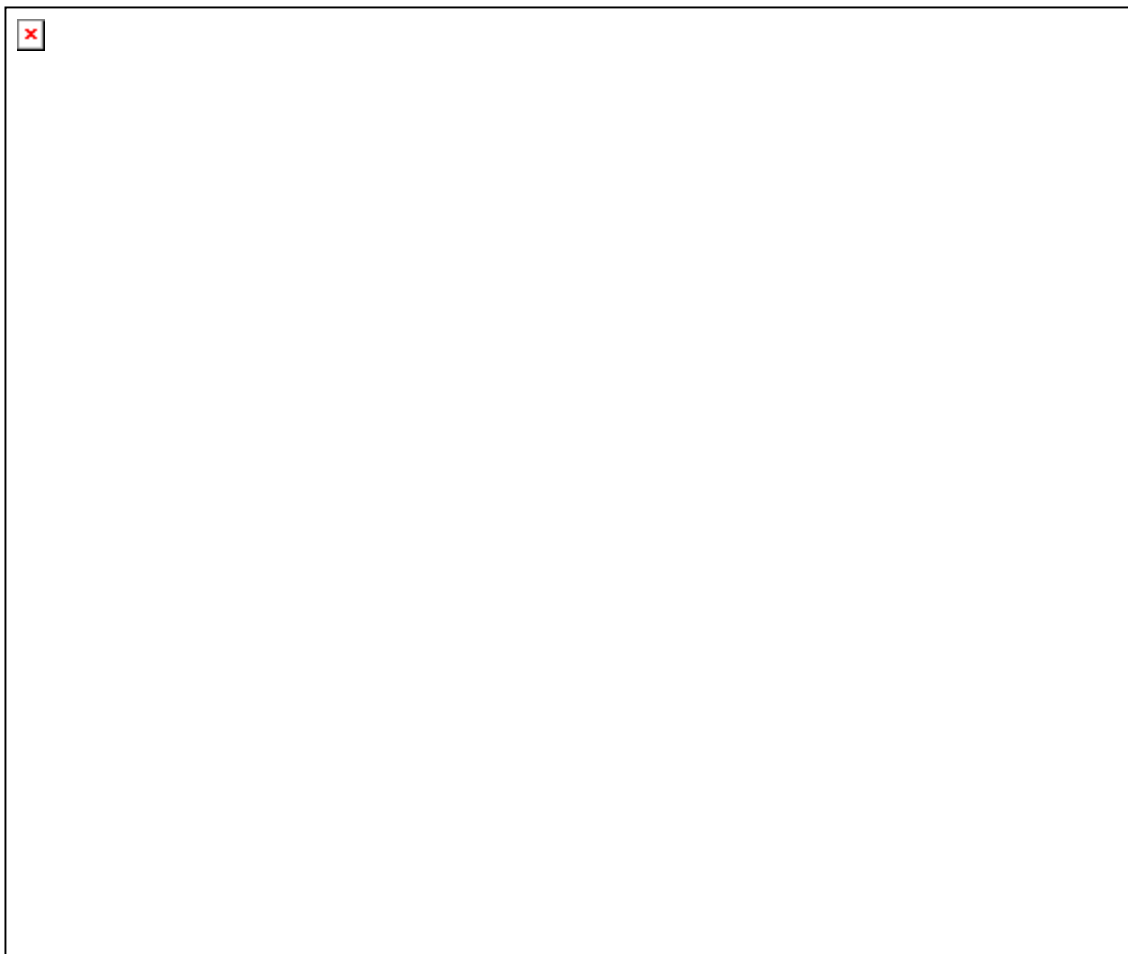
- [1] Šebesta, J. *Radiolokace a Radionavigace*. Skriptum VUT v Brně. Brno, 2003
- [2] Jan, J. Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů. VUT v Brně. Brno, 1997
- [3] Mann, B. C pro mikrokontroléry. BEN-technická literatura. Praha, 2003
- [4] Váňa, V. Atmel AVR – Popis procesorů a instrukční soubor. BEN-technická literatura. Praha, 2003
- [5] Váňa, V. Atmel AVR – Programování v jazyce C. BEN-technická literatura. Praha, 2003
- [6] Katalogový list ATmega2560. Dostupný z WWW : <http://www.atmel.com/>
- [7] Katalogové listy TL7705, TL431, MAX3232. Dostupný z WWW : <http://www.alldatasheet.com/>
- [8] Katalogový list AD7492. Dostupný z WWW : <http://www.analog.com/>
- [9] Specifikace rozhraní RS232. Dostupná z WWW : <http://rs232.hw.cz/#parametry>
- [10] Rozdělení detektorů dopravních radarů. Dostupné z WWW : <http://euler.fd.cvut.cz/predmety/pmzd/cviceni/>
- [11] Punčochář, J. Operační zesilovače v elektronice, 5. vydání. BEN-technická literatura. Praha, 2002

Příloha 1 – Schéma zapojení jednotlivých bloků výpočetního modulu

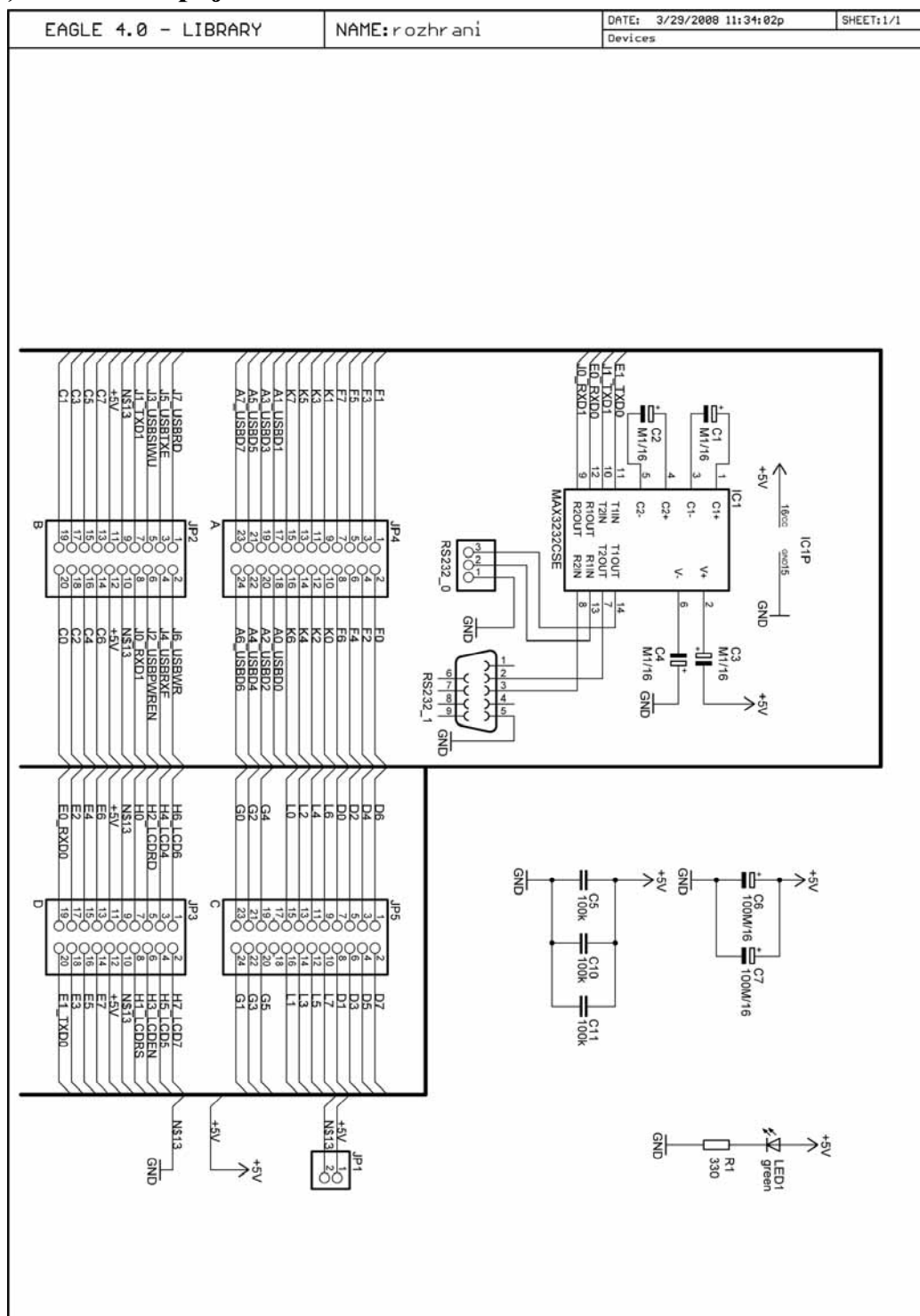
a) Schéma zapojení bloku AD převodu



b) Schéma zapojení bloku mikroprocesoru

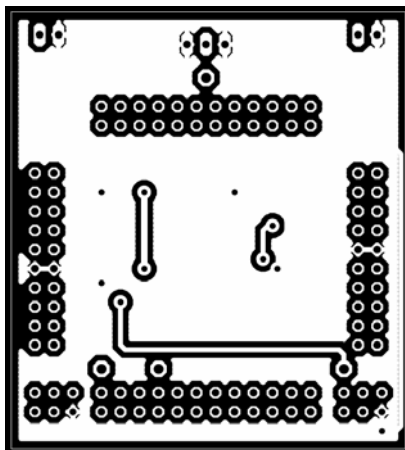


c) Schéma zapojení bloku rozhraní

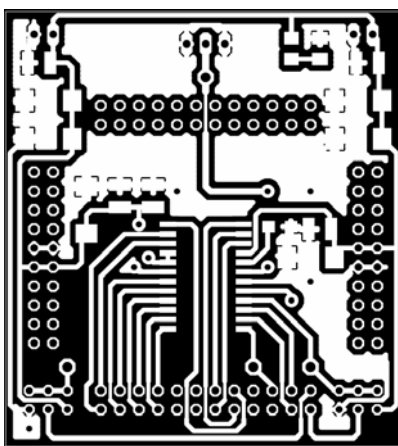


Příloha 2 – Výrobní podklady pro desky plošných spojů jednotlivých bloků systému

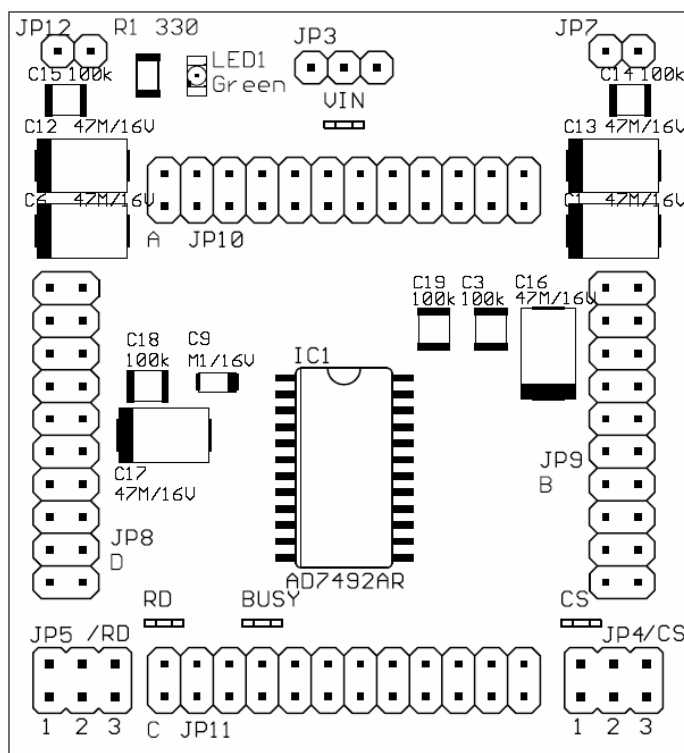
a) Výrobní podklady pro desku plošných spojů bloku AD převodu



Předloha pro výrobu spodní strany DPS bloku AD převodníku (54 mm x 58 mm)



Předloha pro výrobu horní strany DPS bloku AD převodníku (54 mm x 58 mm)



Osazovací schéma horní strany DPS bloku AD převodníku

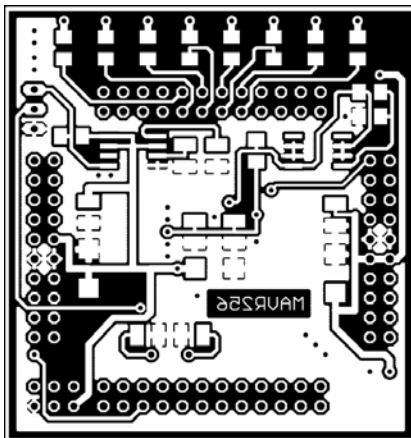
Spodní strana DPS AD převodníku je navržena tak, že neobsahuje žádné elektrotechnické součástky.

Následující tabulka obsahuje seznam součástek, potřebných pro osazení desky plošného spoje bloku AD převodníku.

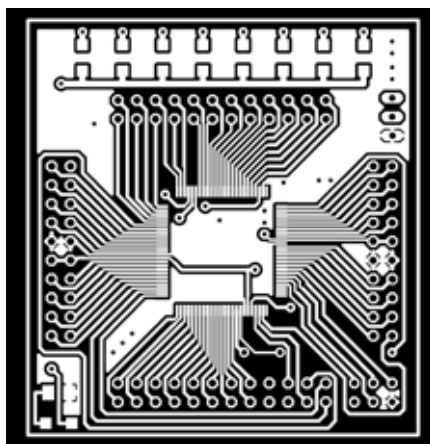
Tabulka – kusovník DPS bloku AD převodníku :

Druh	Hodnota	Pouzdro	Počet	Součástky ve schématu
C	100 nF	1210	5	C3,C14,C15,C18,C19
	M1/16V	SMC_A	1	C9
	47M/16V	SMC_D	6	C1,C6,C12,C13,C16,C17
R	330	1206	1	R1
IC	AD7492AR	SO24L	1	IC1
LED	Green	1206	1	LED1
JP	jumper	2x3	2	JP4,JP5
	jumper	1x3	1	JP3
	jumper	1x2	2	JP7,JP12
	dutinkova_lista	2x10	2	JP8,JP9
	dutinkova_lista	2x12	2	JP10,JP11

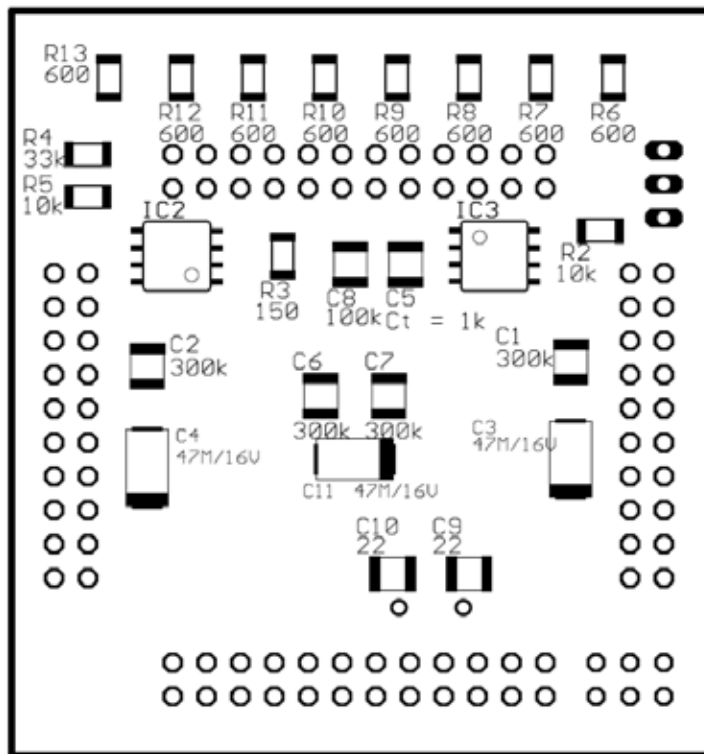
b) Výrobní podklady pro desku plošných spojů bloku mikroprocesoru



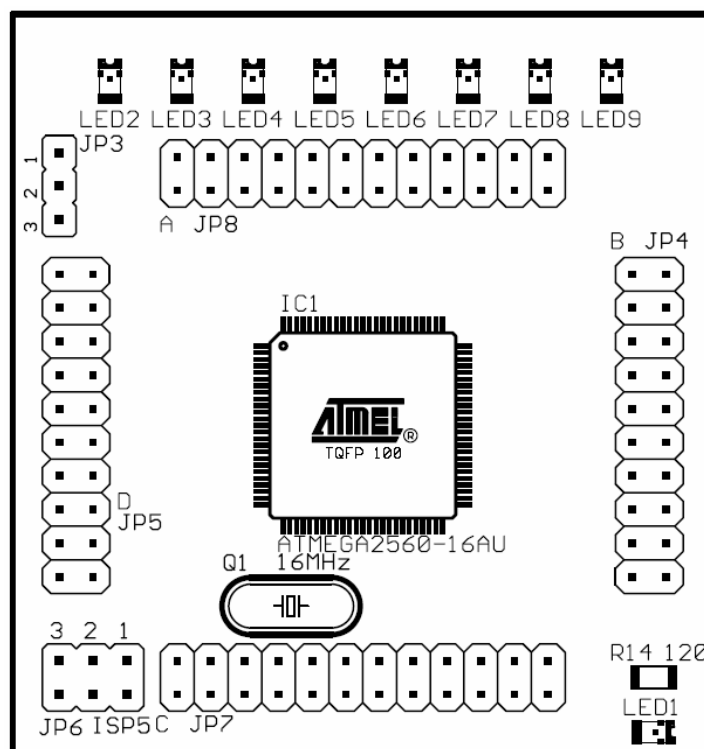
Předloha pro výrobu spodní strany DPS bloku mikroprocesoru (54 mm x 58 mm)



Předloha pro výrobu horní strany DPS bloku mikroprocesoru (54 mm x 58 mm)



Osazovací schéma spodní strany DPS bloku mikroprocesoru



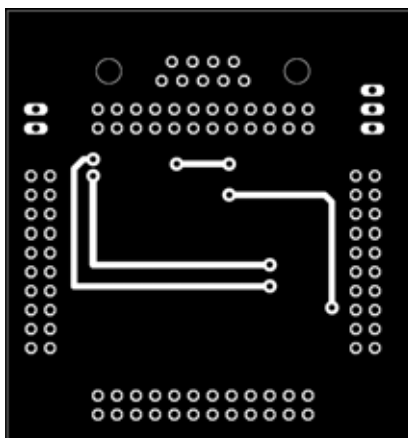
Osazovací schéma horní strany DPS bloku mikroprocesoru

Následující tabulka obsahuje seznam součástek, potřebných pro osazení desky plošného spoje bloku mikroprocesoru :

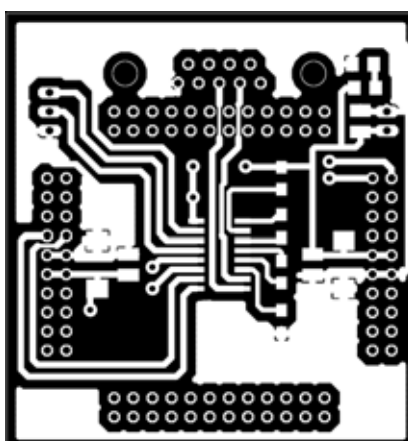
Tabulka – kusovník DPS bloku mikroprocesoru :

Druh	Hodnota	Pouzdro	Počet	Součástky ve schématu
C	22 pF	1210	2	C9,C10
	1 nF	1210	1	C5
	100 nF	1210	1	C8
	300 nF	1210	4	C1,C2,C6,C7
	47M/16V	SMC_C	3	C3,C4,C11
R	120	1206	1	R14
	150	1206	1	R3
	600	1206	8	R6,R7,R8,R9,R10,R11,R12,R13
	10k	1206	2	R2,R4
	33k	1206	1	R5
IC	ATmega2560	TQFP100	1	IC1
	TL431	SOIC8	1	IC2
	TL7705	SOIC8	1	IC3
LED	Green	1206	9	LED1,LED2,LED3,LED4,LED5,LED6,LED7,LED8,LED9
Q	11.0592MHz	HC49/S	1	Q1
JP	jumper	S1G3S	1	JP3
	jumper	S2G3W	1	JP6
	kolikova_lista	2x10	2	JP4,JP5
	kolikova_lista	2x12	2	JP7,JP8

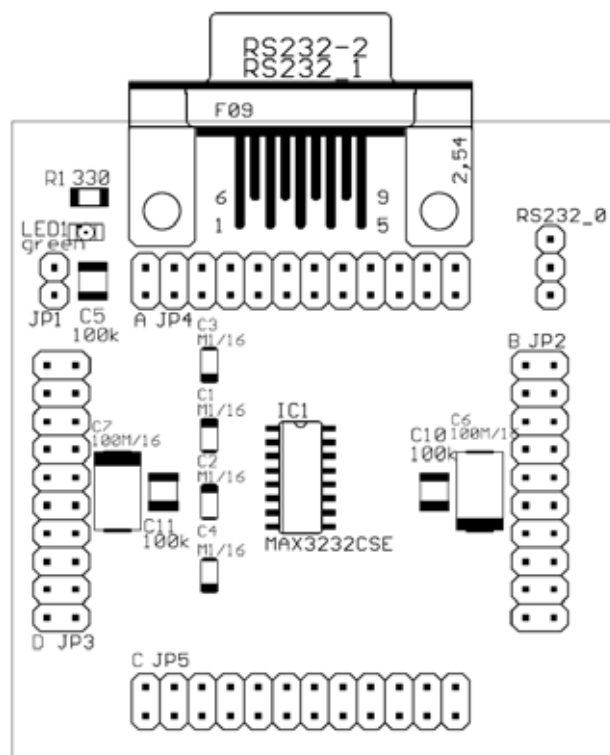
c) Výrobní podklady pro desku plošných spojů bloku rozhraní



Předloha pro výrobu spodní strany DPS bloku rozhraní (54 mm x 58 mm)



Předloha pro výrobu horní strany DPS bloku rozhraní (54 mm x 58 mm)



Osazovací schéma horní strany DPS bloku rozhraní

Spodní strana DPS AD převodníku je navržena tak, že neobsahuje žádné elektrotechnické součástky.

Následující tabulka obsahuje seznam součástek, potřebných pro osazení desky plošného spoje bloku rozhraní :

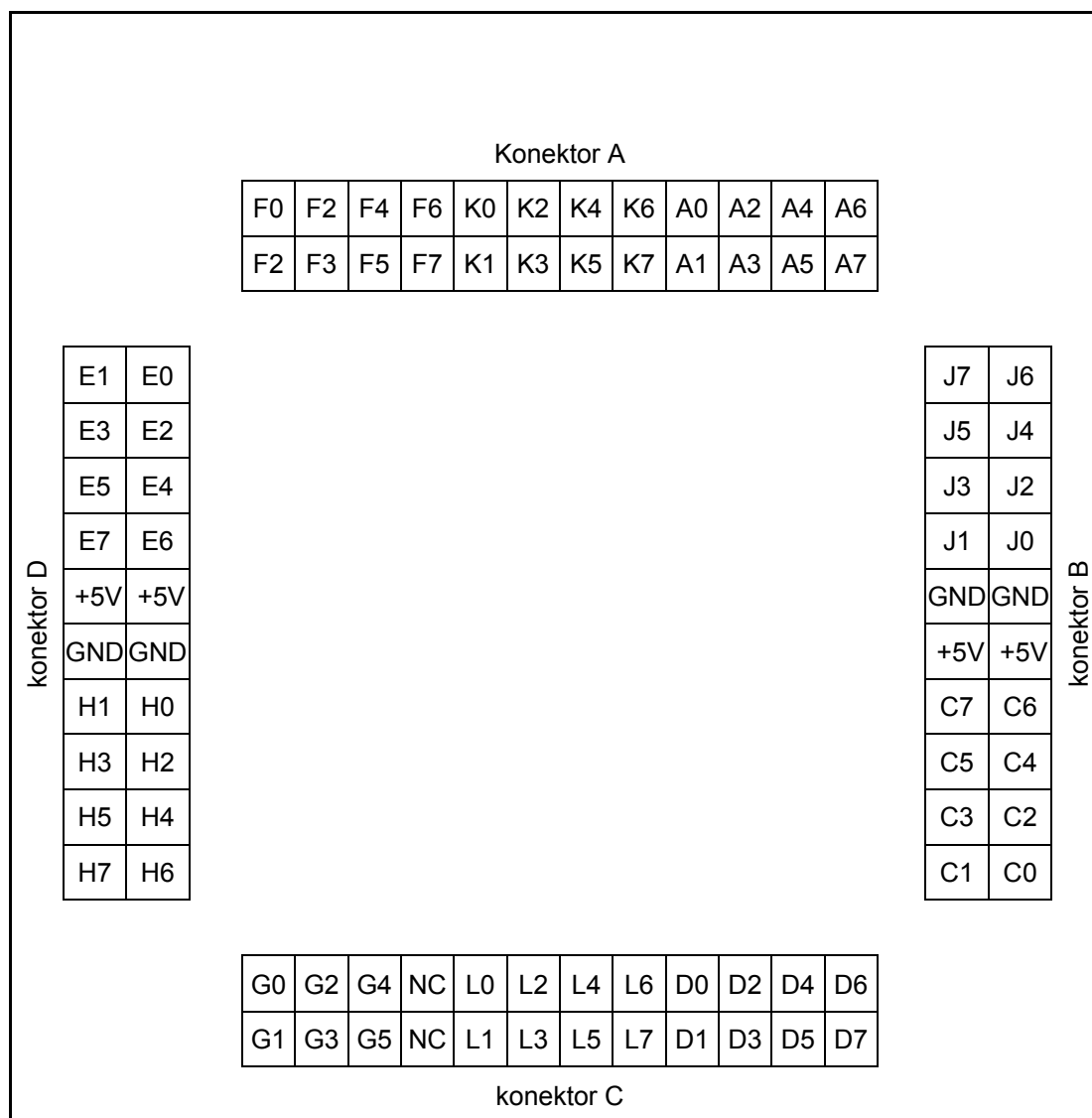
Tabulka – kusovník DPS bloku rozhraní :

Druh	Hodnota	Pouzdro	Počet	Součástky ve schématu
C	100 nF	1206	3	C5,C10,C11
	M1/16V	SMC_A	4	C1,C2,C3,C4
	100M/16V	SMC_D	2	C6,C7
R	330	1206	1	R1
IC	MAX3232CSE	SO16	1	IC1
LED	Green	1206	1	LED1
CON	F09H	F09H	1	RS232_1
JP	dutinkova_lista	2x10	2	JP2,JP3
	dutinkova_lista	2x12	2	JP4,JP5
	jumper	1x2	1	JP1
	jumper	1x3	1	RS232_0

Příloha 3 – Popis systémové sběrnice a propojení desek plošných spojů jednotlivých bloků zařízení

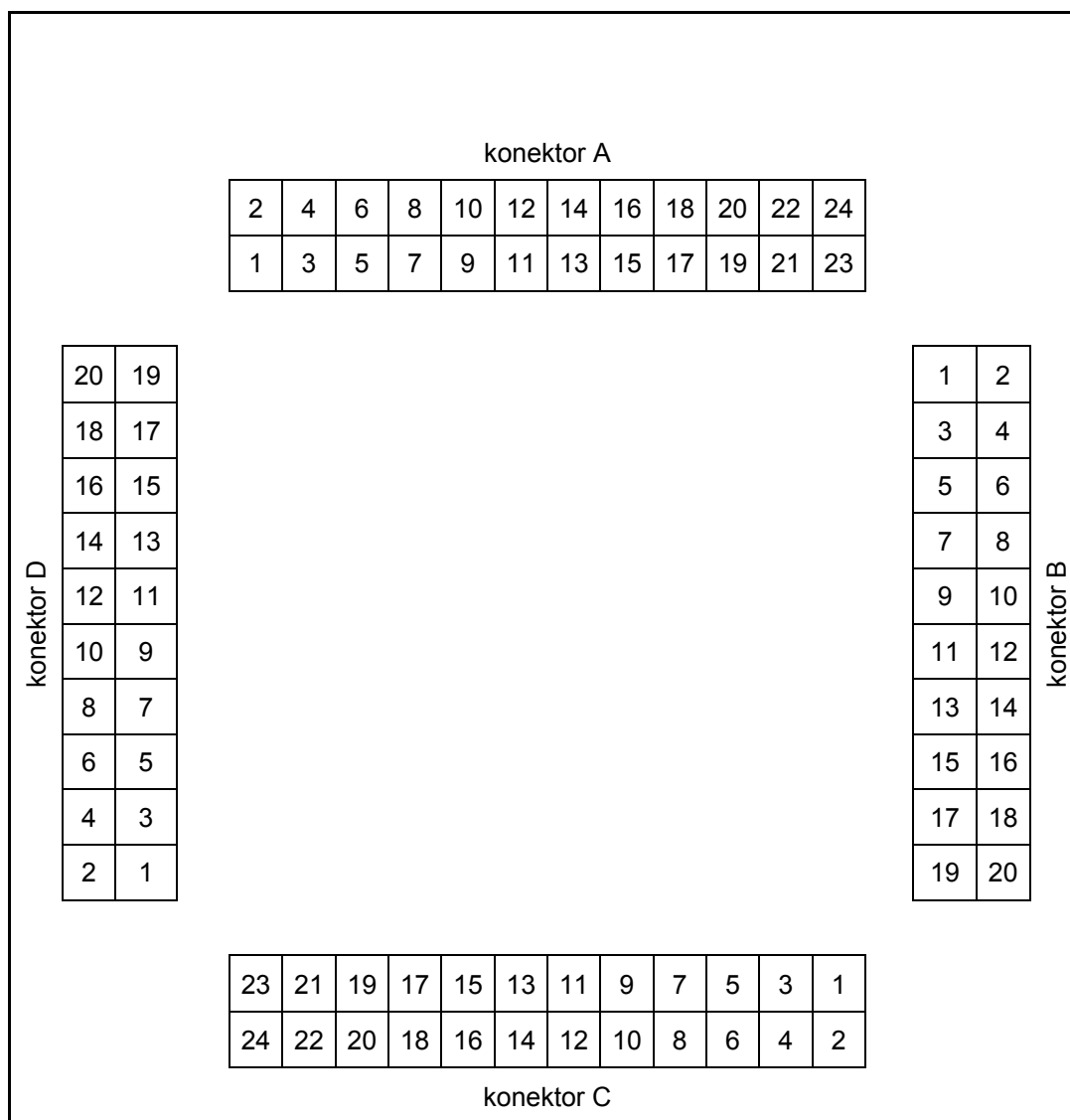
V této příloze je popsáno propojení navrženého systému prostřednictvím systémové sběrnice. Všechny vodiče této systémové sběrnice prostupují všemi deskami plošných spojů navrženého výpočetního modulu.

Tato sběrnice je realizována prostřednictvím čtyř konektorů. Jeden pár těchto konektorů má strukturu 2x10 pinů a druhý pár má strukturu 2x12 pinů. Jelikož jádrem tohoto navrženého systému je blok mikroprocesoru, tato sběrnice vlastně připojuje datové a řídicí vodiče okolních modulů k jeho vstupně/výstupním branám. Rozložení vývodů mikroprocesoru ATmega2560 na konektorech systémové sběrnice při pohledu na propojený systém shora popisuje následující obrázek.



Rozložení linek mikroprocesoru na systémové sběrnici při pohledu shora

Způsob číslování pinů jednotlivých konektorů systémové sběrnice popisuje následující obrázek.



Číslování pinů konektorů systémové sběrnice

Způsob propojení signálů všech tří bloků je zachycen v následující tabulce, která popisuje, které vstupně/výstupní piny mikroprocesoru jsou propojeny s piny obvodů zbylých dvou bloků.

Tabulka - Popis a význam jednotlivých pinů konektorů systémové sběrnice

Konektor A

Číslo pinu	Pin mikroprocesoru	Pin na desce rozhraní	Pin na desce AD převodníku
1	F1	NC	NC
2	F0	NC	NC
3	F3	NC	NC
4	F2	NC	NC
5	F5	NC	NC
6	F4	NC	NC
7	F7	NC	NC
8	F6	NC	NC
9	K1	NC	NC
10	K0	NC	NC
11	K3	NC	NC
12	K2	NC	NC
13	K5	NC	NC
14	K4	NC	NC
15	K7	NC	NC
16	K6	NC	NC
17	A1	NC	NC
18	A0	NC	NC
19	A3	NC	NC
20	A2	NC	NC
21	A5	NC	NC
22	A4	NC	NC
23	A7	NC	NC
24	A6	NC	NC

Konektor B

Číslo pinu	Pin mikroprocesoru	Pin na desce rozhraní	Pin na desce AD převodníku
1	J7	NC	NC
2	J6	NC	NC
3	J5	NC	NC
4	J4	NC	NC
5	J3	NC	NC
6	J2	NC	NC
7	J1	TXD1	NC
8	J0	RXD1	NC
9	GND	GND	GND
10	GND	GND	GND
11	+5V	+5V	+5V
12	+5V	+5V	+5V
13	C7	NC	NC
14	C6	NC	NC
15	C5	NC	NC
16	C4	NC	NC
17	C3	NC	NC
18	C2	NC	NC
19	C1	NC	NC
20	C0	NC	NC

Konektor C

Číslo pinu	Pin mikroprocesoru	Pin na desce rozhraní	Pin na desce AD převodníku
1	D6	NC	DB06
2	D7	NC	DB07
3	D4	NC	DB04
4	D5	NC	DB05
5	D2	NC	DB02
6	D3	NC	DB03
7	D0	NC	DB00
8	D1	NC	DB01
9	L6	NC	NC
10	L7	NC	NC
11	L4	NC	NC
12	L5	NC	NC
13	L2	NC	DB10
14	L3	NC	DB11
15	L0	NC	DB08
16	L1	NC	DB09
17	NC	NC	NC
18	NC	NC	NC
19	G4	NC	BUSY
20	G5	NC	NC
21	G2	NC	CONVST
22	G3	NC	PS/FS
23	G0	NC	CS
24	G1	NC	RD

Konektor D

Číslo pinu	Pin mikroprocesoru	Pin na desce rozhraní	Pin na desce AD převodníku
1	H6	NC	NC
2	H7	NC	NC
3	H4	NC	NC
4	H5	NC	NC
5	H2	NC	NC
6	H3	NC	NC
7	H0	NC	NC
8	H1	NC	NC
9	GND	GND	GND
10	GND	GND	GND
11	+5V	+5V	+5V
12	+5V	+5V	+5V
13	E6	NC	NC
14	E7	NC	NC
15	E4	NC	NC
16	E5	NC	NC
17	E2	NC	NC
18	E3	NC	NC
19	E0	RXD0	NC
20	E1	TXD0	NC

Příloha 4 – Schéma zapojení jednotlivých bloků modulu vstupní úpravy signálu včetně kusovníku

Schéma zapojení modulu vstupní úpravy signálu

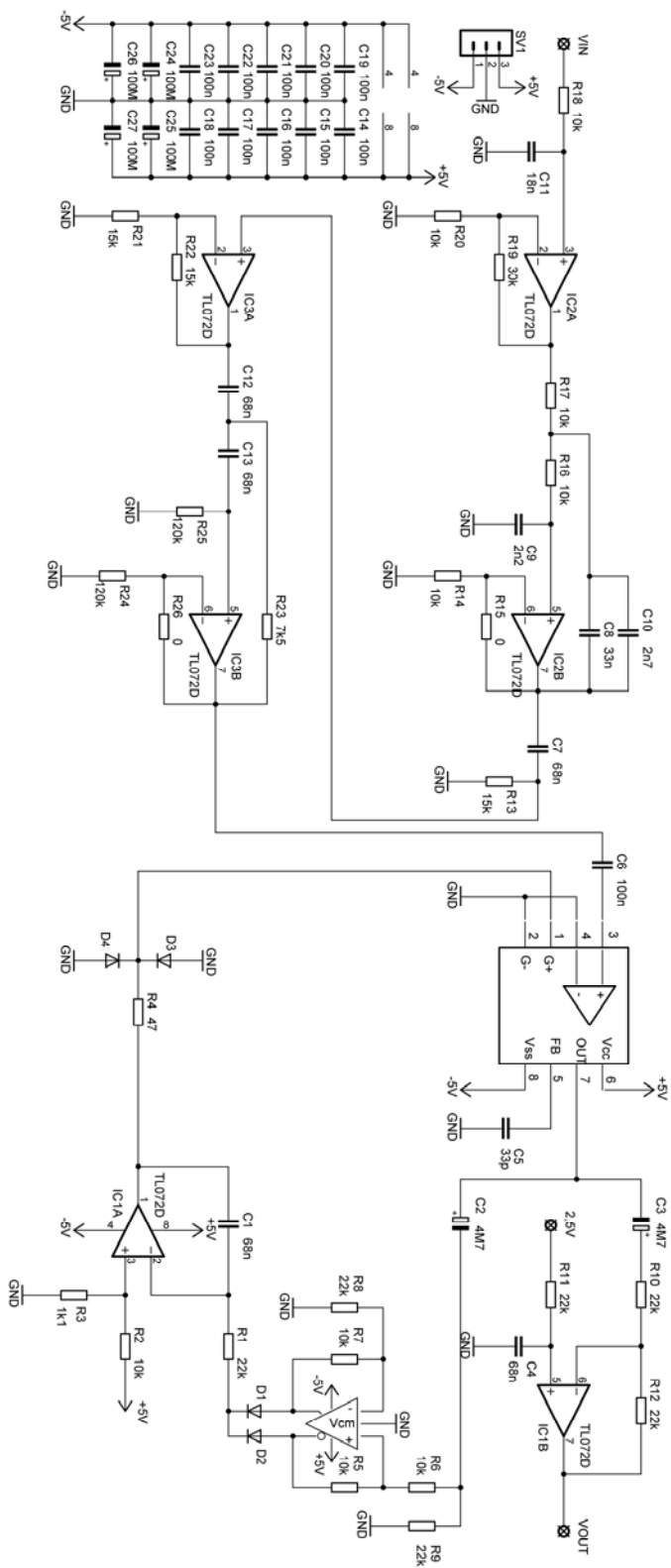


Schéma zapojení obvodů vstupní úpravy signálu

Kusovník modulu vstupní úpravy signálu

Druh	Hodnota	Pouzdro	Počet
C	33 pF	1206	1
	2.2 nF	1206	1
	2.7 nF	1206	1
	18 nF	1206	1
	33 nF	1206	1
	68 nF	1206	4
	100 nF	1206	12
	4M7/16V	SMC_C	2
	100M/16V	SMC_C	4
R	0	1206	2
	47	1206	1
	1k1	1206	1
	7k5	1206	1
	10k	1206	9
	15k	1206	3
	22k	1206	6
	30k	1206	1
	120k	1206	2
IC	TL072	SO8	3
	AD603	SO8	1
	AD8137	SO8	1
D	1N4007	SM1	4
CON	MA03-1	MA03-1	1

Příloha 4 - Simulace programového vybavení mikrokontroléru v prostředí MatLab

Výpis programového kódu z prostředí MatLab pro realizaci FFT nad vzorky harmonického signálu :

```
close all;
clc;
clear;
%pocet vzorku v casove oblasti
display('Pocet vzorku signalu je :');
del=512
%vzorkovaci kmitocet
display('Vzorkovaci kmitocet je :');
frek=8000
%vzorkovaci perioda
tvz=1/frek;
%nahodny vektor pro simulaci rychlosti vozidla
display('Zadany kmitocet zaznejoveho signalu je : ')
%x=rand(1)*4000
x=180
%odpovida rychlosti vozidla
display('Coz odpovida rychlosti vozidla :')
rychlost_01=(x*3*3.6)/(93.5*2)
%vytvoreni posloupnosti vzorku
for k=1:del
    vzorky(k)=sin(2*pi*x*k*tvz); %vzorky odebrane ze signalu behem 2
ms
end
%provedeni FFT nad polem "del" vzorku
s=fft(vzorky);
%vzdalenost spektralnich car v Hz
df=frek/(del-1);
%nalezeni nejvetsi spektralni slozky
maxik=-1;
index=-1;
for i=1:del
    if maxik<abs(s(i))
        maxik=abs(s(i));
        index=i;
    end;
end;
%urceni rozdiloveho kmitoctu
display('Vypocitany zaznejovy kmitocet');
frekvence=(index-1)*df
%urceni rychlosti po provedeni fft
display('Vypocitana hodnota rychlosti');
rychlost_02=(frekvence*3*3.6)/(93.5*2)
%vypocet rozdilu vstupni rychlosti (nahodne cislo) a vypocitane po fft
display('Rozdil mezi vypoctenou a puvodni rychlosti');
delta=(rychlost_01-rychlost_02)
```

Výpis výsledků simulace programu v prostředí MatLab :

Počet vzorků signálu je :

$\text{del} = 512$

Vzorkovací kmitočet je :

$\text{frek} = 8000$

Zadaný kmitočet zázňového signálu je :

$x = 180$

Což odpovídá rychlosti vozidla :

$\text{rychlost_01} = 10.3957$

Vypočítaný zázňový kmitočet :

$\text{frekvence} = 187.8669$

Vypočítaná hodnota rychlosti :

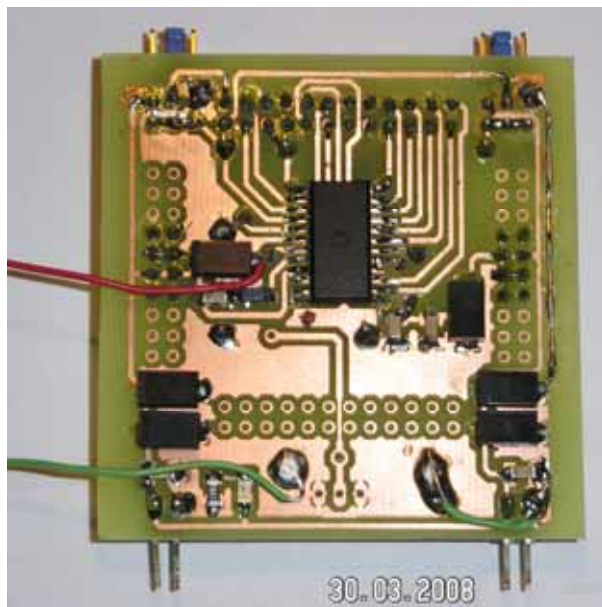
$\text{rychlost_02} = 10.8501$

Rozdíl mezi vypočtenou a původní rychlosti :

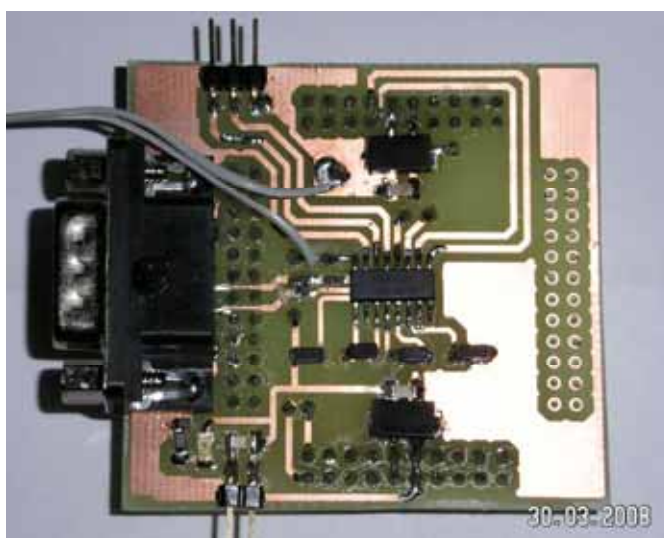
$\text{delta} = -0.4543$

Příloha 5 – Fotografie

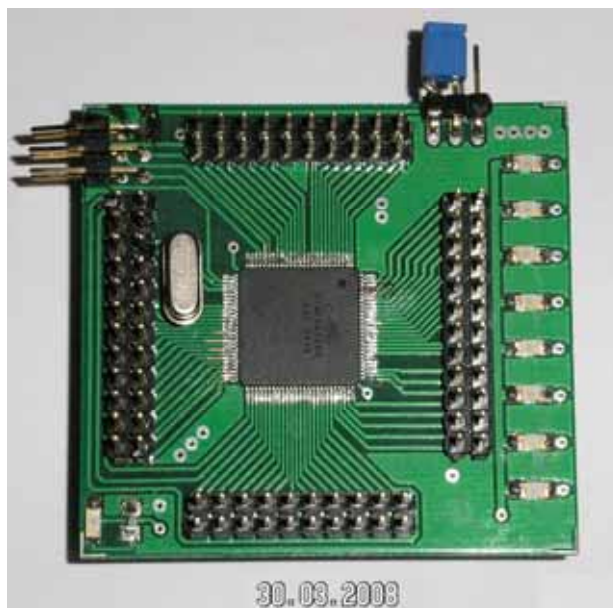
Fotografie osazených a odzkoušených jednotlivých bloků modulu. Fotografie z laboratoře.



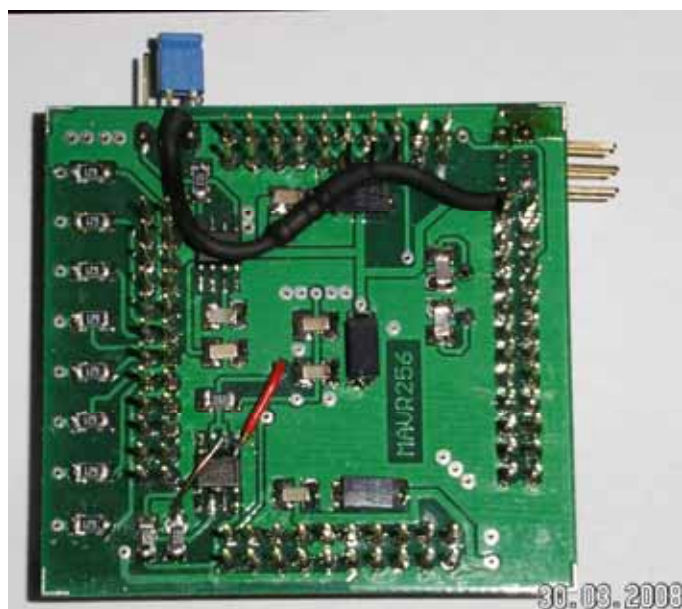
Fotografie osazené DPS bloku AD převodníku – horní vrstva



Fotografie osazené DPS bloku rozhraní – horní vrstva



Fotografie osazené DPS bloku mikroprocesoru – horní vrstva



Fotografie osazené DPS bloku mikroprocesoru – spodní vrstva



Fotografie sestaveného modulu



Fotografie z testování v laboratoři



Fotografie z testování v laboratoři